



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

HENRY KORPI
PUTKIPALKKIRISTIKON JA PILARIN LIITOKSEN SUUNNITTELU
JA LASKENTA

Diplomityö

Tarkastajat: Dosentti Kristo Mela ja
TkL Dan Pada
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Talouden ja rakentamisen
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
25. toukokuuta 2017

TIIVISTELMÄ

HENRY KORPI: Putkipalkkiristikon ja pilarin liitoksen suunnittelu ja laskenta
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 70 sivua, 93 liitesivua
Elokuu 2017
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Rakennesuunnittelu
Tarkastajat: Dosentti Kristo Mela ja TkL Dan Pada

Avainsanat: FEM, yläpaarre, diagonaali, liitos, kehämalli

Putkipalkkiristikon ja pilarin välinen liitos mitoitetaan usein nivelellisenä liitoksena. Ristikko on pilarissa kiinni ainoastaan yläpaarten ja pilarin välisellä liitoksella. Tällaisessa ristikossa uloin diagonaali kiinnittyy yläpäästään yläpaarteeseen mahdollisimman lähelle paarten ja pilarin välistä liitosta. Ristikon ja pilarin välisen liitoksen mitoitus tapahtuu rakenneosilla vaikuttavien rasitusten perusteella, jotka määritetään yleensä yksikulotteista elementtimenetelmää käyttävillä laskentaohjelmilla.

Pilarin ja yläpaarten välisessä liitoksessa mitoitettavia komponentteja ovat ruuvit, yläpaarten kestävyys sekä liitoslevyjen kestävyys. Tavanomaisesti mallinnettavalla kehämallilla, jossa pilarin ja yläpaarten sekä diagonaalin ja yläpaarten keskilinjat kohtaavat nivelellisinä, ei saada riittävän tarkkaa tietoa rasituksista, jotta kaikkien rakenneosien mitoittaminen onnistuisi yksiselitteisesti. Tämän työn tarkoituksena on kehittää uusi kehämalli. Kehämallin avulla halutaan saada tietoa rasituksista, jotka vaikuttavat ruuveihin, liitoslevyihin sekä yläpaarteeseen.

Liitoksen käyttäytymistä, liitoslevyjen taipumaa sekä ruuveihin kohdistuvaa vetorasitusta tutkittiin kolmiulotteisella FEM-analyysillä, jossa rakenne jaetaan pieniin osiin, joita kutsutaan elementeiksi. Elementit liittyvät toisiinsa pisteissä, joita kutsutaan solmuiksi ja analysointi perustuu elementtikentän siirtymiin. FEM-analysointi tehtiin Ansys 18.0 -ohjelmalla, johon liitos mallinnettiin kolmiulotteisina solidielementteinä. Malliin luotiin koko ristikko, jotta liitosalueella vaikuttavat rasitukset saatiin oikeiksi. Liitosaluetta lukuun ottamatta koko malli tehtiin sauvaelementein laskennan keventämiseksi.

Kahdesta erilaisesta liitoksesta tehtiin eurokoodin mukainen mitoitus tavanomaisen kehämallin antamien rasitusten perusteella. Tämän jälkeen kehiteltiin uusi kehämalli yksikulotteista elementtimenetelmää käyttävään laskentaohjelmaan, jonka antamalla rasituksilla laskelmat tehtiin uusiksi. Uuden kehämallin antamien rasitusten vastaavuus todellisiin rasituksiin todennettiin kolmiulotteisella FEM-analyysillä.

Tutkimuksen perusteella uuden kehämallin antamat tulokset ovat varsin hyviä. Tulokset vastaavat hyvin lähelle kolmiulotteisen FEM-analyysin antamia tuloksia, ja niiden perusteella voidaan mitoittaa liitoksen eri komponentit.

ABSTRACT

HENRY KORPI: Design and calculation of a joint between a hollow section truss and a column

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 70 pages, 93 Appendix pages

August 2017

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Engineering

Examiners: Docent Kristo Mela and TkL Dan Pada

Keywords: FEM, top chord, diagonal, joint, frame model

A joint between a hollow section truss and a column is usually designed as a hinged connection. The truss is joined to the column only from the top chord. In this case the outermost diagonal is connected to the top chord as near to the column as possible. Calculation of the strength of the joint between the truss and the column is performed with stresses that are defined with structural design software using a one-dimensional elemental method.

In a joint between a hollow section truss and a column there are three components which must be designed. Components are bolts, a connection plate and a top chord. The center line of the column and the center line of the top chord intersect and the center line of the column and the center line of the diagonal intersect when a regular frame model is used. Both intersections behave as hinges. All components cannot be calculated with stresses defined by the regular frame model. The purpose of this study is to develop a new frame model, enabling the design of all components involved.

Behavioral of the joint, the deformation of the connection plate and the tensile stress of bolts are studied with three-dimensional FEM-analysis. The structure is divided into smaller regions called elements which are connected to each other with points called nodes. The analysis is based on displacement of the element field. The analysis was created with Ansys 18.0. The whole truss was modeled so that the effective stresses of the joint would be accurate. The joint was modeled with solid 3D elements and the other parts of the truss were modeled with rod elements.

Analyses were performed for the two calculations from the two different kinds of joints. Structural analysis according to Eurocode was performed and stresses for the joints were defined with the regular frame model. The new frame model was developed. Both joints were analyzed again according to Eurocode, based on the stresses from the new frame model. Results of the new frame model were verified with the three-dimensional FEM-analysis.

Based on the study, the results achieved from the new frame model were quite good and correspond to the three-dimensional FEM-analysis. Based on these results, the new model can be used to calculate the different components of the joint.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Ruukki Construction Oy:lle osana diplomi-insinöörin tutkintoa.

Haluan kiittää työnantajaani Ruukki Construction Oy:tä työni mahdollistamisesta sekä työtovereitani, jotka ovat muista kiireistään huolimatta jaksaneet ja ehtineet avustaan työhöni liittyvissä asioissa.

Suuret kiitokset kuuluvat työni tarkastajille tekniikan lisensiaatti Dan Padalle sekä dosentti Kristo Melalle ja erityisesti myös olennaisesti diplomityöprosessissa mukana olleelle ja korvaamatonta apua tarjonneelle ohjaajalleni professori Markku Heinisuoille. Heidän kaikkien antamat neuvot sekä ohjaus työhön on ollut perusteellista ja asiantuntevaa. Lassi-Pekka Taskiselle erityiskiitokset asiantuntevasta ja korvaamattomasta avusta sekä Ansys-ohjelman käyttöön että kolmiulotteiseen FEM-laskentaan liittyen.

Työn tekeminen on ollut raskas ja vaativa prosessi, ja se on opettanut kärsivällisyyttä, pitkäjänteisyyttä sekä alaani liittyvää asiantuntemusta. Suurimmat kiitokset tärkeimmälle tuelleni vaimolleni Pamelalle. Ilman tukeasi ja kannustustasi en olisi nyt tässä vaiheessa työni kanssa.

Seinäjoella, 22.8.2017

Henry Korpi

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	LIITOSTYYPIN ESITTELY JA MITOITUSPERUSTEET	3
2.1	Liitoksen rakenne	3
2.2	Pilarin ja yläpaarteen välinen palkki-pilari -liitos	4
2.3	Yläpaarteen ja diagonaalin välinen liitos	7
3.	EUROKOODIN MUKAINEN LIITOKSEN MITOITUS	8
3.1	Vahvistamaton yläpaarteen ja diagonaalin välinen liitos	9
3.1.1	Lähtötiedot ja rasitukset	9
3.1.2	Yläpaarteen ja diagonaalin liitos	12
3.1.3	Yläpaarteen kestävyys tuella	15
3.2	Vahvistettu yläpaarteen ja diagonaalin välinen liitos	17
3.2.1	Lähtötiedot ja rasitukset	17
3.2.2	Yläpaarteen ja diagonaalin liitos	20
3.2.3	Yläpaarteen kestävyys tuella	22
4.	LIITOKSEN KOLMIULOTTEINEN FEM-MALLINNUS	24
4.1	Mallin esittely ja reunaehdot	24
4.2	Vahvistamaton yläpaarteen ja diagonaalin liitos	29
4.3	Vahvistettu yläpaarteen ja diagonaalin liitos	33
5.	UUSI MITOITUSMENETELMÄ JA LASKENTAMALLI	39
6.	LASKELMAT	44
6.1	Vahvistamaton yläpaarteen ja diagonaalin välinen liitos	44
6.1.1	Lähtötiedot ja rasitukset	44
6.1.2	Yläpaarteen pistekuormakestävyys tuella	45
6.1.3	Ruuviliitoksen kestävyys	47
6.1.4	Liitoslevyn taivutuskestävyys	51
6.2	Vahvistettu yläpaarteen ja diagonaalin välinen liitos	53
6.2.1	Lähtötiedot ja rasitukset	54
6.2.2	Yläpaarteen pistekuormakestävyys tuella	55
6.2.3	Ruuviliitoksen kestävyys	55
6.2.4	Liitoslevyn taivutuskestävyys	56
7.	TULOKSET	59
7.1	Kehämallien ja FEM-analyysien vertailu	59
7.2	Yläpaarteen ja pilarin leveyssuhteen vaikutus liitoslevyyn	62
7.3	Diagonaalin ja pilarin välisen vapaavälin tutkiminen	63
7.4	Diagonaalin ja yläpaarteen välisen liitoksen vahvikelevyn materiaali	64
8.	YHTEENVETO	67
	LÄHTEET	69
	LIITTEET	70

LYHENTEET JA MERKINNÄT

FEM	Finite Element Method
E	Teräksen kimmomoduli
f_{y0}	Paarresauvan myötöraja
f_b	Paarresauvan sivun lommahduslujuus
f_{y2}	Uumasauvan myötöraja
f_{yp}	Liitoslevyn myötöraja
f_{up}	Liitoslevyn murtolujuus
f_{yb}	Ruuvien myötöraja
f_{ub}	Ruuvien murtolujuus
$W_{el,0}$	Paarresauvan kimmoteorian mukainen taivutusvastus
$W_{pl,0}$	Paarresauvan plastisuusteorian mukainen taivutusvastus
γ_{M0}	Poikkileikkauskestävyyden osavarmuusluku
γ_{M1}	Sauvan kestävyys osavarmuusluku stabiiliuden tarkastuksessa
γ_{M2}	Ruuvien kestävyys osavarmuusluku liitoksessa
γ_{M5}	Rakenneputkien liitosten kestävyys osavarmuusluku ristikoissa
k_{FI}	Luotettavuusluokasta riippuva kuormakerroin
ψ_0	Kuorman yhdistelykerroin
g	Diagonaalin ja pilarin välinen vapaaväli
e	Liitoksen epäkeskisyyden / ruuvien kannan pisin mitta
θ	Uumasauvan liittymiskulma paarresauvaan
S_s	Puristuskuorman jakautumispituus paarteelle
A_0	Paarresauvan poikkileikkauspinta-ala
A_v	Leikkauspinta-ala
b_0	Paarresauvan leveys
h_0	Paarresauvan korkeus
t_0	Paarresauvan seinämävahvuus
r_0	Paarresauvan nurkkapyöritystys
r_i	Paarresauvan nurkkapyörityksen sisämitta
h_1	Pilarin pituus
b_2	Uumasauvan leveys
h_2	Uumasauvan korkeus
t_2	Uumasauvan seinämävahvuus
b_p	Liitoslevyn leveys / paarteen pinnan vahvikelevyn leveys
h_p	Liitoslevyn pituus
t_p	Liitoslevyn paksuus
L_p	Paarteen pinnan vahvikelevyn pituus
$b_{e,p}$	Tehollinen leveys lävistysleikkautumisen kestävyys tarkastelussa
b_{eff}	Uumasauvan tehollinen leveys
l_{eff}	Liitoslevyn tehollinen pituus
m	Liitoslevyn ruuvien reiän keskiön etäisyys paarteen kyljen pinnasta
n	Liitoslevyn ruuvien reiän keskiön etäisyys liitoslevyn ulkoreunasta
e_1	Ruuvien reiän keskiön ja rakenneosan päädyn välinen etäisyys voiman suunnassa
e_2	Ruuvien reiän keskiön ja rakenneosan päädyn välinen etäisyys voimaa vastaan kohtisuorassa suunnassa

t_v	Paarteen uuman vahvikelevyn paksuus
A_s	Ruuvien leikkauspinta-ala
d	Ruuvien halkaisija
s	Ruuvien kannan avainmitta
e	Ruuvien kannan pisin mitta / Liitoksen epäkeskisyyys
d_m	Ruuvien kannan avainmitan ja pisimmän mitan keskiarvo
α_v	Ruuvien lujuusluokasta riippuva kerroin
L_b	Ruuvien venymäpituus
d_0	Ruuvien reiän halkaisija
A	Venymäelementin poikkileikkausala
L	Venymäelementin pituus
G	Ristikön omapaino
G_k	Katon omapaino
$Q_{s,k}$	Lumikuorman ominaisarvo
$F_{w,k}$	Tuulikuorman ominaisarvo
p_{Ed}	Ristikön kokonaiskuorma
N_0	Yläpaarteen normaalivoima
M_0	Yläpaarteen taivutusmomentti
Q_0	Yläpaarteen leikkausvoima
N_1	Pilarin normaalivoima
N_2	Diagonaalin normaalivoima
N_3	Ruuvien normaalivoima
Q_3	Ruuvien leikkausvoima
N_{Rd}	Yläpaarteen kestävyys solmutarkastelussa
$N_{c,Rd}$	Yläpaarteen puristuskestävyys
$M_{pl,Rd}$	Yläpaarteen plastinen taivutuskestävyys
$V_{pl,Rd}$	Yläpaarteen plastinen leikkauskestävyys
$M_{v,Rd}$	Yläpaarteen leikkausvoiman pienentämä taivutuskestävyys
$F_{w,Rd}$	Pistekuormakestävyys
$F_{t,Rd}$	Ruuvien vetokestävyys
$F_{v,Rd}$	Ruuvien leikkauskestävyys
$F_{b,Rd}$	Levyn reunapuristuskestävyys
$B_{b,Rd}$	Ruuvien lävistymiskestävyys
p	Ruuvien veto- ja leikkauskestävyyden yhteisvaikutuksen käyttöaste
$F_{t1,Rd}$	Liitoslevyn murtumismallin 1 mukainen taivutuskestävyys
$F_{t2,Rd}$	Liitoslevyn murtumismallin 2 mukainen taivutuskestävyys
$F_{t3,Rd}$	Liitoslevyn murtumismallin 3 mukainen taivutuskestävyys
$M_{pl1,Rd}$	Liitoslevyn murtumismallin 1 plastinen taivutusmomentti
$M_{pl2,Rd}$	Liitoslevyn murtumismallin 2 plastinen taivutusmomentti
σ_{M0}	Paarresauvan taivutusjännitys
σ_{N0}	Paarresauvan puristusjännitys
k_n	Paarresauvan pinnan normaalijännityksen aiheuttama termi
β	Uumasauvan leveyden suhde paarresauvan leveyteen
η	Uumasauvan korkeuden suhde paarresauvan leveyteen
β_p	Uumasauvan leveyden suhde vahvikelevyn leveyteen
η_p	Uumasauvan korkeuden suhde vahvikelevyn leveyteen

ρ	Pienennystekijä yläpaarteen leikkausvoiman pienentämään taivutuskestävyyteen
k	Ruuvien ja liitoslevyn yhteisjousivakio
k_5	Päätylevyn taivutuksen jäykkyystekijä / Pistevoimakestävyyden tarkastelussa käytettävä kerroin
k_{10}	Ruuvien vedon jäykkyystekijä
C_F	Pistevoimakestävyyden tarkastelussa kuormituksen sijainnista riippuva tekijä
k_3	Pistevoimakestävyyden tarkastelussa käytettävä kerroin
k_4	Pistevoimakestävyyden tarkastelussa käytettävä kerroin
k_5	Pistevoimakestävyyden tarkastelussa käytettävä kerroin / Päätylevyn taivutuksen jäykkyystekijä
a_b	Levyn reunapuristuskestävyyden laskennassa käytettävä kerroin
k_1	Levyn reunapuristuskestävyyden laskennassa käytettävä kerroin
k_2	Ruuvien kannan muodosta riippuva kerroin

1. JOHDANTO

Tässä tutkimuksessa tutkitaan putkipalkkiristikon ja pilarin sekä ristikon uloimman diagonaalin ja yläpaarteen välistä liitosta. Putkipalkkiristikon ja pilarin liitokselle ei ole eurokoodissa määrättyä yksiselitteistä laskentakaavaa, vaan liitoksen laskennassa sovelletaan useita eri menetelmiä liitoksen eri osille. Yläpaarteen ja diagonaalin väliselle liitokselle on eurokoodissa määrätty laskentakaavat. Tutkimuksen tavoitteena on kehittää laskentamallit liitoskokonaisuudelle, jossa otetaan huomioon sekä palkki-pilari -liitos että uloimman diagonaalin ja yläpaarteen välinen Y-liitos.

Tutkittavan liitoskokonaisuuden kaksi eri liitosta mitoitetaan eurokoodin mukaan kahdena toisistaan riippumattomana liitoksena. Liitokset ovatkin toiminnaltaan kaksi eri liitosta, mutta liitosten välinen etäisyys on yleensä epäkeskisyyden minimoimisesta johtuen lyhyt, joten uloimman diagonaalin liitos voi vaikuttaa palkki-pilari -liitoksen kestävyYTEEN ja päinvastoin. Paarteen pinta joudutaan usein vahvistamaan teräslevyllä uloimman diagonaalin liitoksen kohdalta ja tällöin vahvistuslevynä käytetään usein palkki-pilari -liitoksen jatkettua liitoslevyä, jolloin näiden liitosten yhteisvaikutus saattaa muodostua merkittäväksi.

Nykyään etenkin pitkissä ja raskaasti kuormitetuissa putkipalkkiristikoissa yläpaarteen materiaalina käytetään usein lujempaa terästä kuin teräslaji S355, joka on todennäköisesti yleisin teräslaji Pohjoismaissa. Eurokoodissa määrätään, että vahvikelevyn lujuuden tulee olla vähintään paarusauvan materiaalin mukainen [1]. Tämä hankaloittaa ristikon tuotantoa, koska S355 lujuusluokkaa lujempia levyosia on vaikeammin saatavilla, kuin S355 lujuusluokan terästä.

Liitoksen tutkiminen tehdään kolmiulotteisella FEM-mallinnuksella, jolla liitoskokonaisuudesta saadaan tarkkaa dataa. FEM-mallinnusohjelmalla Ansyskella [12] luodaan tutkittavasta liitoksesta tarkka kolmiulotteinen malli, jota analysoidaan luomalla mallille riittävät reunaehdot ja rasitukset. Malleja luodaan useampi vaihtoehto, jolloin tutkimuksen tarkkuutta saadaan parannettua. Liitoksen yksinkertaisempaan analysointiin luodaan uusi kehämalli yksiulotteista FEM-laskentaa käyttävään ohjelmaan. Uuden kehämallin luomista varten tehdään myös laskentaa käsin, jotta malliin saadaan kaikki rakenneosat luotua siten, että ne vastaavat kolmiulotteisen FEM-analyysin antamia tuloksia ja parametreja. Uusien kehämallivaihtoehtojen tuloksia verrataan kolmiulotteisen FEM-analyysin tuloksiin ja niiden perusteella etsitään parhaiten tilanteeseen sopiva vaihtoehto. Mitoituksen paikkansa pitävyys todennetaan tekemällä FEM-malliin sellainen elementtiverkotus, että sitä tihentämällä tulokset eivät enää merkittävästi muutu. Tuloksia verrataan myös Ruukki Construction Oy:n koetuloksiin vastaavan liitoksen tapauksessa.

Edellä mainittu tutkimusmenetelmä toimii tässä tutkimuksessa hyvin, koska tutkittavana kohteena on vain yksi erilainen liitoskokonaisuus. Tutkittava liitos käyttäytyy eri parametreilla hyvin samankaltaisesti, joten tutkimuksen tarkkuus pysyy riittävänä.

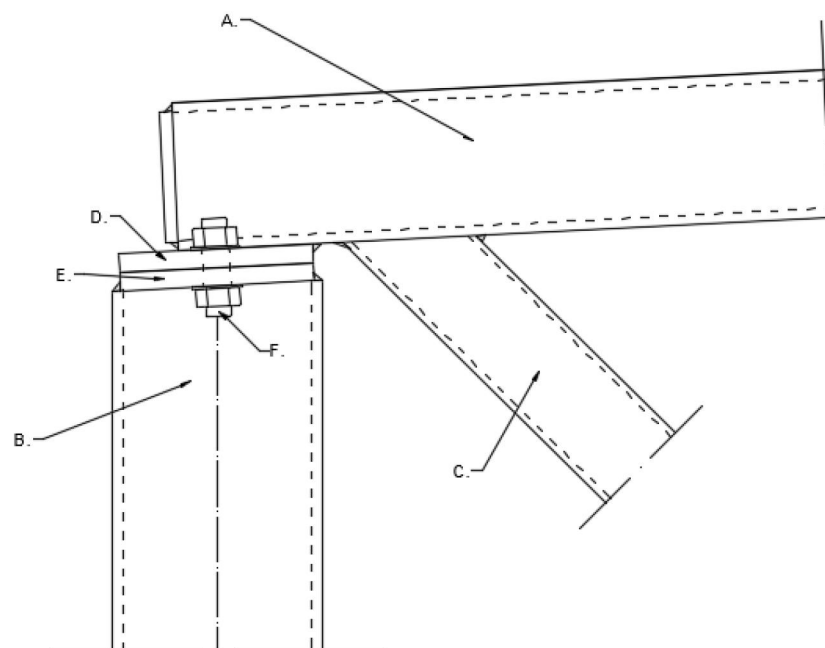
Tämän työn liitosten mitoitus perustuu standardeihin SFS-EN 1993-1-8 [1] sekä SFS-EN 1993-1-1 [9], mitkä käsittelevät teräsrakenteiden liitosten mitoitusta sekä teräsrakenteiden mitoitusta yleisesti. Työssä tärkeänä lähteenä käytetty SSAB:n Domex Tube -käsikirja selittää hyvin seikkaperäisesti tässä työssä tutkittavan liitoksen mitoituksen perustuen edellä mainittuihin standardeihin [2]. Myös Teräsrakenneyhdistys Ry:n (TRY) julkaisuista löytyy ohjeita teräsrakenteiden suunnitteluun liittyen.

2. LIITOSTYYPIN ESITTELY JA MITOITUSPERUSTEET

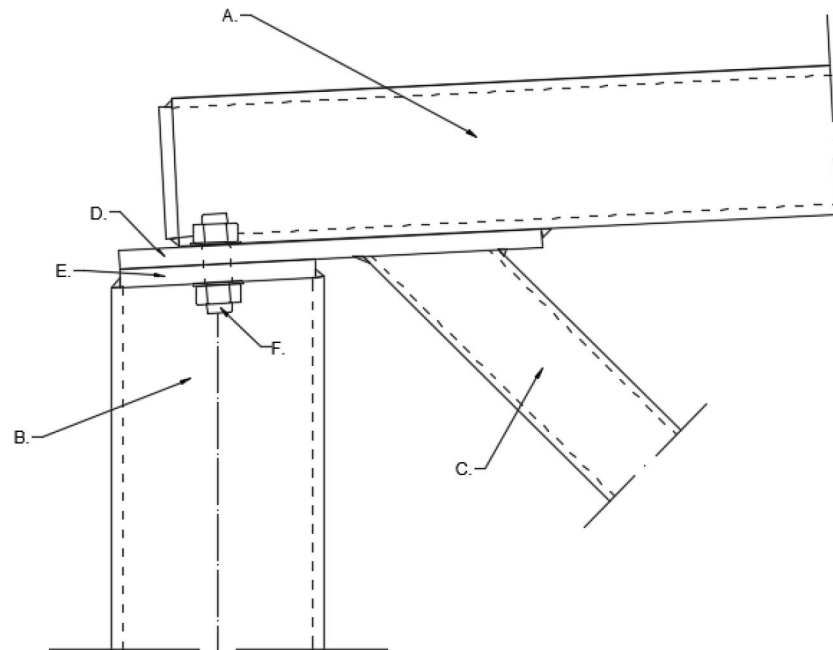
2.1 Liitoksen rakenne

Tutkimuskohteena olevaa liitosta käytetään usein ristikon ja pilarin välisenä liitoksena silloin, kun rakenne ei ole ristikon avulla kehäjäykistetty. Kehäjäykistämättömässä ristikossa ristikon alapaarre ei liity pilarin kylkeen, vaan kaikki ristikolta tuleva kuorma välittyy pilarille yläpaartein kautta. Tällaisen ristikon uloin diagonaali pyritään tuomaan mahdollisimman lähelle pilari-palkki -liitosta liitoskokonaisuuden epäkeskisyyden minimoimiseksi. Diagonaalin ja yläpaartein liitos toteutetaan aina hitsaamalla osat toisiinsa, mutta mikäli paartein pinnan kestävyys niin vaatii, joudutaan pintaa vahvistamaan erillisellä levyosalla. Vahvistaminen voidaan toteuttaa jatkamalla yläpaartein pilari-palkki -liitoksen liitoslevyä niin pitkäksi, että se ulottuu diagonaalin ja paartein liitoksen vahvikelevyksi.

Kuva 1 havainnollistaa kyseessä olevaa liitosta, jossa diagonaalin ja paartein välistä liitosta ei ole vahvistettu levyosalla. Kuvassa 2 on esitetty vastaava liitos sellaisena, että siinä on diagonaalin ja paartein välinen liitos vahvistettu jatkamalla yläpaartein pilari-palkki -liitoksen liitoslevyä.



Kuva 1 Liitoskokonaisuus, jossa diagonaalin ja paartein liitos on vahvistamaton



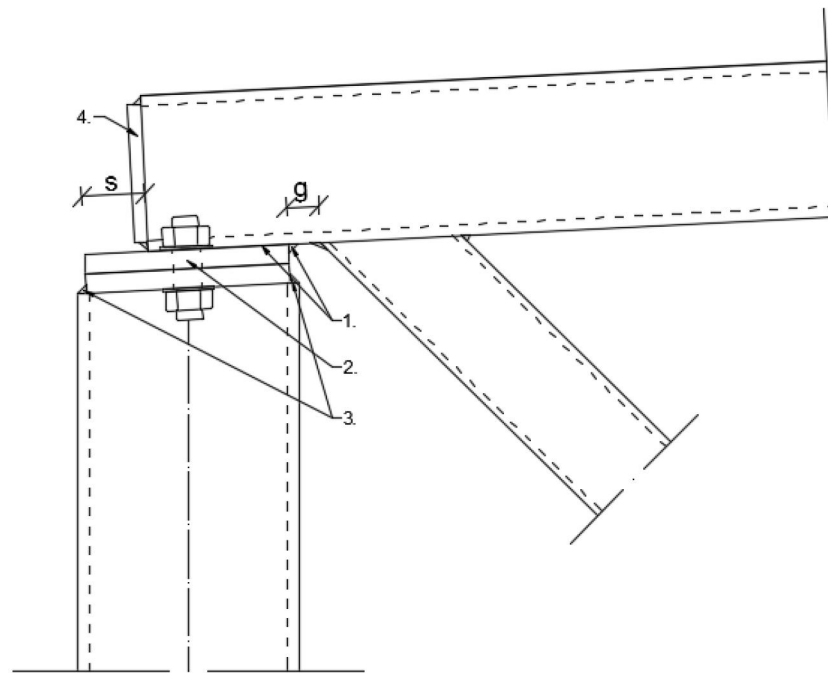
Kuva 2 Liitoskokonaisuus, jossa diagonaalin ja paarteen liitos on vahvistettu

Kuvissa 1 ja 2 esiintyvät olennaisimmat osat on esitetty kirjaimin A-F. A on putkipalkkiristikon yläpaarre, B pilari, C ristikon uloin diagonaali, D yläpaarteen liitoslevy, E pilarin liitoslevy ja F palkki-pilari -liitoksen liitosruuvi. Kuvissa näkyvä yläpaarteen liitoslevy D on kuvassa 2 jatkettu siten, että se ulottuu diagonaalin C ja yläpaarteen A välisen liitoksen vahvikelevyksi.

2.2 Pilarin ja yläpaarteen välinen palkki-pilari -liitos

Kuvassa 3 on esitetty tavanomainen pilarin ja yläpaarteen välinen liitos. Kuvan numeroidut kohdat 1 ja 3 osoittavat liitoksessa tarvittavia hitsejä, g on liitoksen vapaaväli, kohta 2 liitoksen kiinnitysruuvi, kohta 4 yläpaarteen päätylevy ja mitta s osoittaa paarteen päädyn etäisyyttä pilarin ulkolinjasta. Liitoksen kokonaisuus vaihtelee tilanteesta ja voimasuureista sekä profiileista riippuen. Kuvan 3 mukaisessa liitoksessa on 2 ruuvia (yksi paarteen molemmalla puolella), mutta niitä voidaan laittaa myös 4 tai enemmän. Yläpaarteen pääty voidaan viedä esimerkiksi pilarin ulkopinnan kanssa samalle tasalle, mutta tässä tapauksessa pääty on jätetty sisemmäksi levyosien lukumäärän minimoimiseksi (pilarin päätylevy on niin leveä, että siihen voidaan kiinnittää kehien väliset orret, jolloin niitä varten ei tarvitse tehdä erillisiä levyosia). Kuvien 3 ja 4 numeroidut kohdat 3 osoittavat hitsien lisäksi pilarin päätylevyn asemoinnin. Päätylevy jätetään pilarin ulkolinjalla aina pilarin ulkoreunaa sisemmäksi, jotta levy voidaan hitsata kuvien osoittamalta puolelta, eikä päätylevy jää pilarin ulkolinjaa ulommaksi. Pilarin sisälinjalla pää-

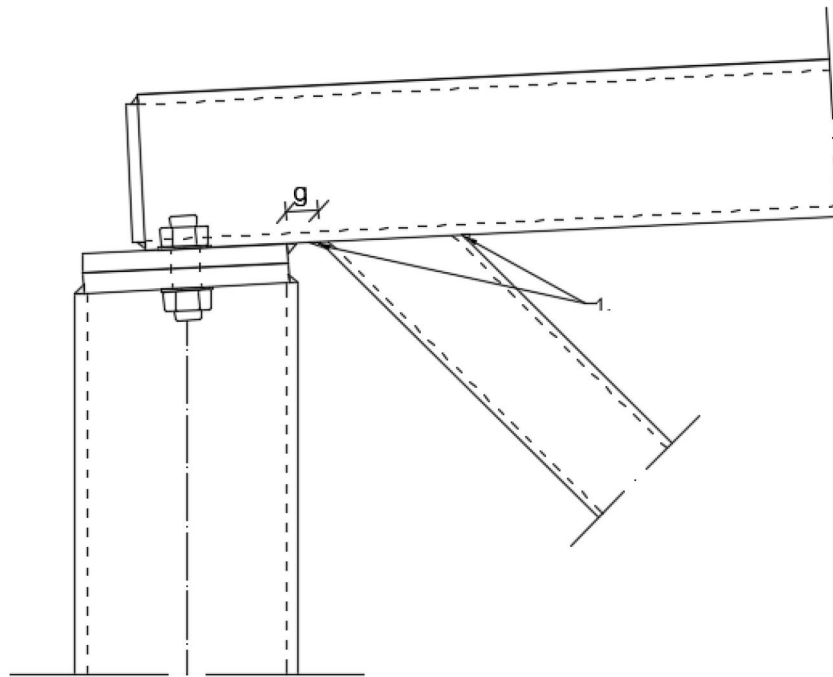
tylevy voidaan tuoda pilarin sisäreunaa sisemmäksi, mutta silloin liitoksen vapaaväliä g joudutaan kasvattamaan. Tässä työssä tutkittavissa liitoksissa päätylevyn sisäreuna on jätetty pilarin sisäreunaa sisemmäksi.



Kuva 3 Yläpaarteen ja pilarin välisen liitoksen periaatekuva.

2.3 Yläpaarteen ja diagonaalin välinen liitos

Diagonaalin ja yläpaarteen liitos mitoitetaan normaalina ristikon Y- tai K-liitoksena, riippuen vapaavälistä g [1]. Tässä työssä käsiteltävässä liitoksessa uumasauva on vedetty ja parresauva puristettu. Pilari voi olla puristettuna tai vedettynä. Tavanomaisesti pilariin kohdistuu puristusvoima mutta tuulen nosteen ollessa hallitseva pilariin voi kohdistua vetovoima. Tässä työssä tutkitaan ainoastaan tilannetta, jossa pilari on puristettuna. Y-liitoksena mitoitettaessa tutkitaan paarteen pinnan myötääminen, paarteen pinnan lävistysleikkautuminen sekä uumasauvan myötääminen. K-liitokselle pitää mitoittaa lisäksi paarteen leikkautuminen. Hitsit mitoitetaan yleensä tasalujina. Liitosta mitoitettaessa tulee myös ottaa huomioon, että liitokselle asetetut parametrien ja materiaalien vaatimukset täyttyvät. [2]



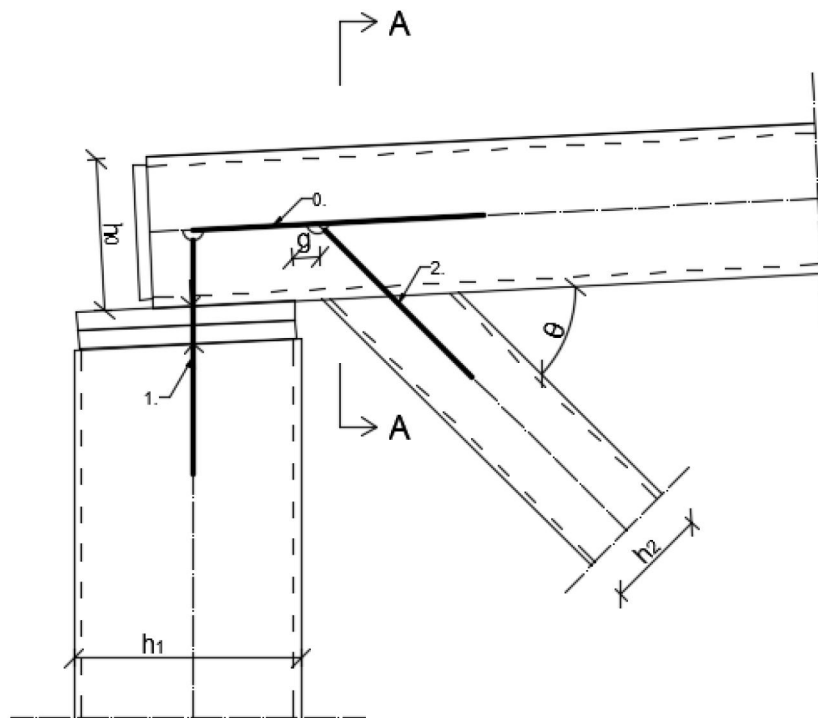
Kuva 5 Yläpaarteen ja uloimman diagonaalin välisen liitoksen periaatekuva

Kuvassa 5 numeroitu kohta 1 osoittaa diagonaalin ja yläpaarteen välisiä hitsejä. Diagonaalin ja paarteen välinen sauma hitsataan ympäri tasalujana hitsinä. Hitsejä ei kuitenkaan tutkita tässä työssä.

3. EUROKOODIN MUKAINEN LIITOKSEN MITOITUS

Tässä luvussa esitellään eurokoodin tapa käsitellä liitoksia. Tutkittavat pilari-palkki- ja yläpaarre-diagonaali -liitokset kuuluvat tutkimuskohteena olevaan liitoskokonaisuuteen. Laskennoissa käytetyt pilarit ovat putkiprofiilisia. Tarkat esimerkkilaskut ovat liitteinä tämän työn lopussa.

Kun tutkittava liitos muutetaan sauvamalliksi, tulee liitokseen nivelet eri osien keskilinjoihin liittymäkohtiin kuvan 6 mukaisesti. Kuvassa olevat paksummat viivat esittävät sauvamallin sauvoja. Kyseisestä kehämallista ei saada ruuveille tulevia rasituksia eikä myöskään paarteelle tulevaa paikallista puristusvoimaa, joten tällä kehämallilla ei voida kyseisiä mitoituksia tehdä.



Kuva 6 Liitoksen kehämalli

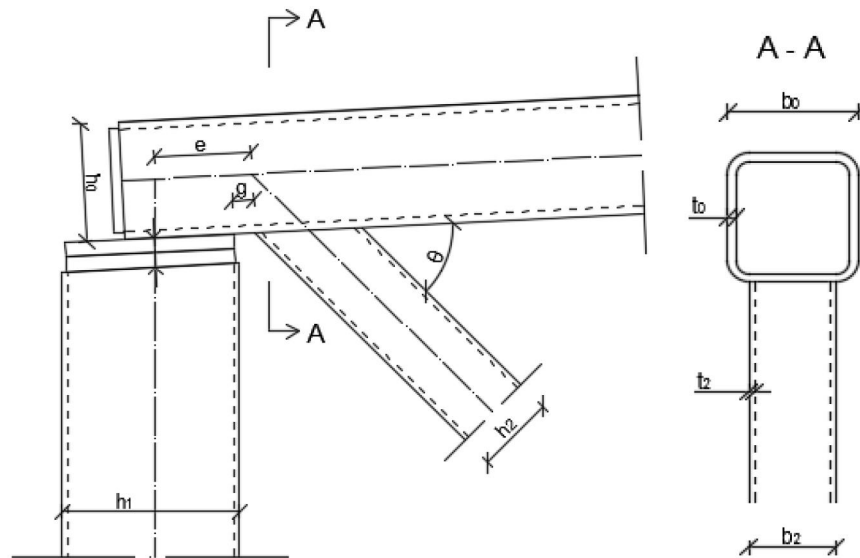
Tällainen kuvan 6 mukainen sauvamalli on yksinkertainen ja nopea mallintaa, mutta se ei ole riittävän tarkka näyttääkseen rasituksia kaikille liitoksessa oleville kriittisille kohdille. Yllä olevaa kehämallia käytetään sekä vahvistamattoman että vahvistetun liitoksen tapauksessa muun muassa Ruukin Winrami laskentaohjelmassa [3].

3.1 Vahvistamaton yläpaarteen ja diagonaalin välinen liitos

Tässä luvussa käsitellään kuvan 7 mukainen liitos, jossa yläpaarteen ja diagonaalin välistä liitosta ei ole vahvistettu levyosalla. Rakenneosien rasitukset on määritetty SCIA Engineer 16.1 -ohjelmalla [4] tietyille kuormille. Tarkemmat laskelmat on esitetty liitteessä 1.

3.1.1 Lähtötiedot ja rasitukset

Kuvassa 7 on esiteltyä mitoitettava liitoskokonaisuus. Mitoituksessa yläpaarteen materiaalina on käytetty teräslaatua S550MH ja diagonaalin materiaalina teräslaatua S420MH. Pilarin materiaali ei vaikuta tämän mitoituksen tulokseen, mutta mainittakoon, että sen on ajateltu olevan teräslaatua S420MH.



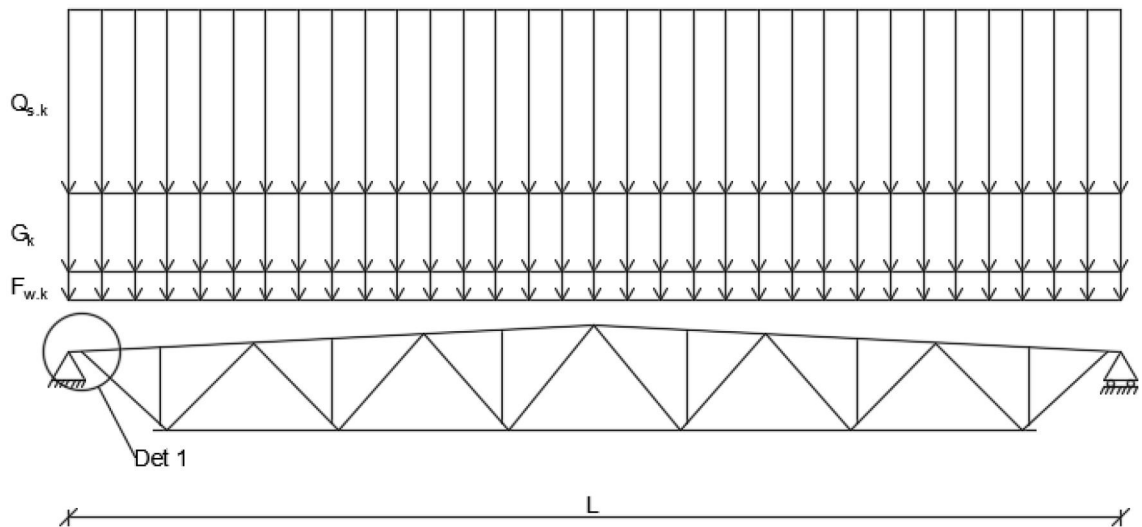
Kuva 7 Mitoitettava liitos

Taulukko 1 sisältää liitoksen eri osien parametreit. Liitokseen liittyvien osien ehdot mitoitukselle sekä vapaavälin ehdot ovat annettu standardissa EN 1993-1-8 [1]. Tämän laskennan osalta ehtojen toteutuminen on tutkittu ja esitelty liitteessä 1, josta käy myös ilmi, että paarteen ja diagonaalin välinen liitos mitoitetaan Y-liitoksena. Kaikki rakenneosat kuuluvat poikkileikkausluokkaan 1 liitteen 1 mukaisesti.

Taulukko 1 Liitoksen parametrit

Suure	Selite	Suuruus
h_0 [mm]	Paarteen korkeus	160
b_0 [mm]	Paarteen leveys	160
t_0 [mm]	Paarteen seinämäpaksuus	8
h_1 [mm]	Pilarin korkeus	250
h_2 [mm]	Diagonaalin korkeus	140
b_2 [mm]	Diagonaalin leveys	140
t_2 [mm]	Diagonaalin seinämäpaksuus	7,1
e [mm]	Epäkeskisyys	135
g [mm]	Vapaaväli	25
α [°]	Yläpaarteen kaltevuus	1,4
θ [°]	Diagonaalin liittymiskulma	33
A_0 [mm ²]	Paarteen poikkipinta-ala	4644,25
$W_{el.0}$ [mm ³]	Paarteen kimmoteorian mukainen taivutusvastus	217654
$W_{pl.0}$ [mm ³]	Paarteen plastisuusteorian mukainen taivutusvastus	260140

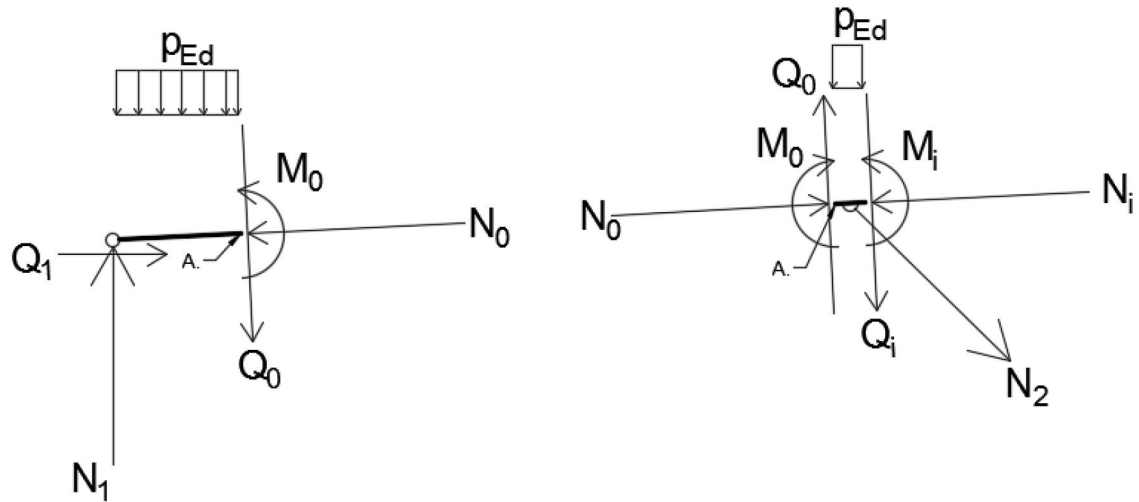
Kuvassa 8 on esiteltynä ristikon rakenne ja yläpaarteeseen kohdistuvat kuormitukset, joilla liitoksessa olevat rasitukset on laskettu. Kuvan osoittama detalji 1 esittää käsiteltävän liitoksen sijaintia.

**Kuva 8** Ristikon topologia, kuormat ja liitoksen sijainti

Taulukko 2 sisältää kuvan 8 osoittamat ristikon kuormitukset sekä liitoksen rasitukset. Liitoksen rasitukset on saatu kaavan (3.1) mukaan lasketun kokonaiskuormituksen perusteella [5]:

$$p_{Ed} = 1,15K_{FI}G_k + 1,15K_{FI}G + 1,5K_{FI}Q_{s,k} + 1,5K_{FI}\psi_0F_{w,k} \quad (3.1)$$

jossa K_{FI} seuraamusluokasta riippuva kuormakerroin ja se on tässä tapauksessa 1,0 seuraamusluokan ollessa CC2. Kaavan kertoimet tulevat standardin EN 1990 Suomen kansallisesta liitteestä [6]. Tuulikuorman yhdistelykerroin $\psi_0 = 0,6$. Kaava (3.1) sekä kuormakerroin ja tuulen yhdistelykerroin on saatu lähteestä [7]. Kaavan (3.1) mukaan kokonaiskuormitukseksi p_{Ed} saadaan 45,77 kN/m. Taulukko 2 sisältää kaavassa käytetyt kuormat ja kuvassa 9 on esitettyä vapaakappalekuvassa yläpaarteeseen vaikuttavat rasitukset.



Kuva 9 Mitoitettavan liitoksen vapaakappalekuvat

Taulukko 2 Ristikön kuormitukset ja rasitukset

Suure	Selite	Suuruus
$Q_{s,k}$ [kN/m]	Lumikuorma	24
G [kN/m]	Ristikön omapaino	0,85
G_k [kN/m]	Katon omapaino	6
$F_{w,k}$ [kN/m]	Tuulikuorma	2,1
p_{Ed} [kN/m]	Kokonaiskuorma	45,77
N_0 [N]	Paarteen normaalivoima	12200
N_1 [N]	Pilarin normaalivoima	549400
N_2 [N]	Diagonaalin normaalivoima	984400
Q_0 [N]	Paarteen leikkausvoima	543200
M_0 [kNm]	Paarteen taivutusmomentti	73,8

Kuvan 9 osoittamien nuolien mukaisesti paarteen normaalivoima on puristusta, pilarin normaalivoima puristusta ja diagonaalin normaalivoima vetoa. Paarteen rasitukset on otettu diagonaalin ja yläpaarteen liitoksen vasemmalta puolelta. Oikealla puolella olevat rasitukset huomioidaan ristikon mitoituksessa.

3.1.2 Yläpaarteen ja diagonaalin liitos

Standardissa EN 1993-1-8 on esitelty kyseisen Y-liitoksen mahdolliset murtumismuodot sekä mitoituskaavat eri muodoille. Mitoitettavat murtumismuodot ovat paarteen pinnan murtuminen, paarteen lävistysleikkautuminen, paarteen leikkausmurtuminen (tämä tutkitaan yläpaarteen ja pilarin liitos -kappaleessa), paarteen uuman myötääminen sekä uumasauvan murtuminen. [1]

Paarteen pinnan kestävyys lasketaan kaavan (3.2) mukaan. Kaava on standardin EN 1993-1-8 taulukossa 7.11 nimellä ”paarteen pinnan murtuminen” [1].

$$N_{Rd} = k_k \times \frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1 - \beta) \sin \theta} \times \left(\frac{2\eta}{\sin \theta} + 4\sqrt{1 - \beta} \right) \gamma_{M5} \quad (3.2)$$

missä tunnettuja arvoja ovat paarteen myötöraja f_{y0} , paarteen seinämävahvuus t_0 , diagonaalin liittymiskulma θ sekä liitoksen osavarmuusluku rakenneputkiliitoksessa ristikossa γ_{M5} . Kaavan alussa oleva kerroin k_k on pienennyskerroin, joka määritetään paarteen lujuuden S550 mukaan arvoksi 0,8 [8]. Tekijä β lasketaan kaavalla

$$\beta = \frac{b_2}{b_0} \quad (3.3)$$

missä b_2 on liittyvän uumasauvan leveys ja b_0 on paartesaauvan leveys. Sijoittamalla lukuarvot kaavaan (3.3) saadaan tekijän β arvoksi 0,88. Tekijä η lasketaan kaavalla

$$\eta = \frac{h_2}{b_0} \quad (3.4)$$

missä h_2 on liittyvän uumasauvan korkeus. Sijoittamalla lukuarvot kaavaan (3.4) saadaan tekijän η arvoksi 0,88. Paarteen ollessa liitoskohdassa vedolla, tekijän k_n arvo on 1,0 ja paarteen ollessa puristuksella tekijä k_n lasketaan alla olevan kaavan (3.5) mukaan:

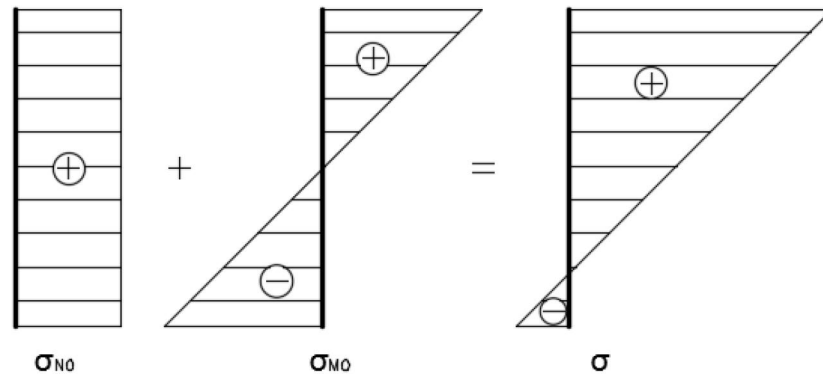
$$k_n = \min \left(1,3 - \frac{0,4 \times n}{\beta}; 1,0 \right) \quad (3.5)$$

jossa n kuvastaa paarteen pinnassa vaikuttavan jännityksen suuruutta ja se lasketaan kaavalla

$$n = \frac{M_0}{W_{el.0} f_{y0} / \gamma_{M5}} + \frac{N_0}{A_0 f_{y0} / \gamma_{M5}} \quad (3.6)$$

Kyseinen kaava pätee, kun voima N_0 ja momentti M_0 on määritelty kuten kuvassa 9. Paarteen pinnan jännitys voidaan määrittää laskemalla yhteen paarteen normaalivoimas-

ta aiheutuva puristusjännitys sekä taivutusmomentista aiheutuva aksiaalinen puristusjännitys. Kuva 10 esittää, kuinka jännitys muodostuu paarteen pintaan. Kuvassa esitetty tilanne on kuvan 9 mukaisessa pisteessä A.



Kuva 10 Paarteen pinnan jännityksen muodostuminen

Normaalivoimasta aiheutuva puristusjännitys lasketaan kaavalla

$$\sigma_{N0} = \frac{N_0}{A_0} \quad (3.7)$$

ja taivutuksesta aiheutuva vetojännitys kaavalla

$$\sigma_{M0} = \frac{M_0}{W_{el,0}} \quad (3.8)$$

Sijoittamalla kaavoihin (3.7) ja (3.8) lukuarvot, saadaan puristusjännitykseksi $\sigma_{N0} = 2,63$ MPa ja vetojännitykseksi $\sigma_{M0} = 339,07$ MPa. Arvoista havaitaan, että paarteen pinta on vedettynä, joten k_n arvona käytetään lukua 1,0.

Sijoittamalla tunnetut lukuarvot sekä lasketut arvot kaavaan (3.2), saadaan paarteen pinnan kestävyysarvoksi $N_{Rd} = 1914,02$ kN. Koska diagonaalin aiheuttama rasitus N_2 liitokseen on 984,40 kN, liitos kestää paarteen pinnan murtumisen osalta.

Paarteen lävistysleikkautumisen kestävyys lasketaan kaavalla (3.9). Kaava on standardin EN 1993-1-8 taulukossa 7.11 nimellä ”lävistysleikkautuminen” [1].

$$N_{Rd} = k_k \times \frac{\frac{f_{y0} t_0}{\sqrt{3} \sin \theta} \times \left(\frac{2h_2}{\sin \theta} + 2b_{e,p} \right)}{\gamma_{M5}} \quad (3.9)$$

jossa $b_{e,p}$ tehollinen leveys. Kaavan alussa oleva kerroin k_k on pienennyskerroin, joka määritetään materiaalilujuuden S550 mukaan arvoksi 0,8 [8].

Tehollinen leveys lasketaan kaavalla

$$b_{e,p} = \min \left(\frac{10}{b_0/t_0} \times b_2, b_2 \right) \quad (3.10)$$

Sijoittamalla arvot kaavaan (3.10), saadaan teholliseksi leveydeksi 70,00 mm.

Sijoittamalla lukuarvot kaavaan (3.9), saadaan lävistysleikkautumisen kestävyysmitoitusravoksi 2440,72 kN. Diagonaalin aiheuttama rasitus liitokseen on 984,40 kN, joten liitos kestää paarteen pinnan lävistysleikkautumisen osalta.

Paarteen uuman lommahtamisen mitoitustkestävyys lasketaan kaavalla

$$N_{Rd} = k_k \times \frac{\frac{f_b t_0}{\sin \theta} \times \left(\frac{2h_2}{\sin \theta} + 10t_0 \right)}{\gamma_{M5}} \quad (3.11)$$

jossa f_b on paarteen sivun lommahduslujuus, joka on tässä tapauksessa yhtä suuri kuin paarteen myötöraja f_{y0} . Kaava on standardin EN 1993-1-8 taulukossa 7.11 nimellä ”paarteen sivun lommahtaminen” [1]. Kaavan alussa oleva kerroin k_k on pienennyskerroin, joka määritetään materiaalilujuuden S550 mukaan arvoksi 0,8 [8].

Sijoittamalla lukuarvot kaavaan (3.11), saadaan paarteen uuman lommahtamisen mitoitustkestävyudeksi 3839,68 kN, joka on huomattavasti suurempi kuin diagonaalin aiheuttama rasitus 984,40 kN, joten liitos kestää paarteen uuman kestävyysosalta.

Uumasauvan murtumisen mitoitusravio lasketaan kaavalla

$$N_{Rd} = 0,8 \times \frac{f_{y2} t_2 (2h_2 - 4t_2 + 2b_{eff})}{\gamma_{M5}} \quad (3.12)$$

jossa f_{y2} on uumasauvan myötöraja, t_2 uumasauvan seinämävahvuus ja b_{eff} uumasauvan tehollinen leveys. Kaava on standardin EN 1993-1-8 taulukossa 7.11 nimellä ”uumasauvan murtuminen” [1]. Uumasauvan tehollinen leveys lasketaan kaavalla

$$b_{eff} = \min \left(\frac{10}{b_0/t_0} \times \frac{f_{y0} t_0}{f_{y2} t_2} \times b_2, b_2 \right) \quad (3.13)$$

Sijoittamalla tunnetut arvot kaavaan (3.13), saadaan tehollisen leveyden arvoksi 103,29 mm.

Sijoittamalla lukuarvot kaavaan (3.12), saadaan uumasauvan murtumisen mitoitusarvoksi 1093,02 kN, joten uumasauva kestää, koska uumasauvan aiheuttama rasitus on 984,40 kN.

Paarteen pinnan kestävyysarvo on 1914,02 kN, paarteen lävistysleikkautumisen kestävyysarvo 2440,72 kN, uuman lommahtamisen kestävyysarvo 3839,68 kN ja uumasauvan murtumisen kestävyysarvo 1093,02 kN. Uumasauvan aiheuttama rasitus on 984,40 kN, mikä on jokaista kestävyysarvoa pienempi, joten liitos kestää sille tulevan rasituksen.

Kaavan (3.3) mukaisen arvon β ollessa välillä $0,85 < \beta < 1,0$, ei tarvitse tutkia kaikkia murtumismuotoja [1]. Havainnollistamisen vuoksi tässä työssä on laskettu kaikki murtumismuodot.

3.1.3 Yläpaarteen kestävyys tuella

Tässä luvussa käsitellään yläpaarteen kestävyysmitoitusta tuella. Mitoitukseen kuuluu tavanomaisten puristuskestävyyden, taivutuskestävyyden ja leikkauskestävyyden sekä tarvittaessa näiden yhteisvaikutuksen mitoituksen lisäksi yläpaarteen pään mitoitus pistetevoimalle. Pistekuormakestävyyttä ei kuitenkaan voida määrittää yksiselitteisesti tässä laskennassa käytetyn kehämallin avulla.

Yläpaarretta rasittaa leikkausvoima, taivutusmomentti ja normaalivoima. Rasitukset on esitetty kuvassa 9. Kaikki rasitukset on mitattu yläpaarteen ja diagonaaliliitoksen vasemmalta puolelta, koska oikealla puolella olevat rasitukset otetaan huomioon ristikon mitoituksessa.

Puristuskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavalla

$$N_{c,Rd} = \frac{A_0 f_{y0}}{\gamma_{M0}} \quad (3.14)$$

missä γ_{M0} on poikkileikkauskestävyyden osavarmuusluku, joka on tässä 1,0. Kaava on standardin EN 1993-1-1 kaava 6.10 [9]. Puristuskestävyyden mitoitusarvoksi saadaan 2554,34 kN. Koska normaalivoiman suuruus on 12,20 kN, poikkileikkaus kestää puristuksen osalta. Taivutuksen ja aksiaalisen voiman yhteisvaikutusta ei tarvitse ottaa huomioon, koska kaavat (3.15) ja (3.16) pätevät. Kaavat ovat standardin EN 1993-1-1 kaavat 6.33 ja 6.34 [9].

$$N_0 \leq 0,25 N_{c,Rd} \quad (3.15)$$

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.16)$$

Paarteen taivutuskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavalla

$$M_{pl.Rd} = \frac{W_{pl.0} f_{y.0}}{\gamma_{M0}} \quad (3.17)$$

missä $W_{pl.0}$ on paarteen plastisuusteorian mukainen taivutusvastus. Kaava on standardin EN 1993-1-1 kaava 6.13 [9]. Tässä voidaan käyttää plastisuusteorian mukaista taivutusvastusta, koska paarre kuuluu poikkileikkausluokkaan 1 [9]. Taivutuskestävyyden mitoitusarvoksi saadaan 143,08 kNm, joten paarre kestää taivutuksen osalta, koska taivutusmomentti on 73,80 kNm.

Leikkauskestävyyden mitoitusarvon laskentakaava on:

$$V_{pl.Rd} = \frac{A_v \times \left(f_{y.0} / \sqrt{3} \right)}{\gamma_{M0}} \quad (3.18)$$

missä A_v on paarteen leikkauspinta-ala. Kaava on standardin EN 1993-1-1 kaava 6.18 [9]. Suorakaiteen muotoisen rakenneputken leikkauspinta-ala lasketaan kaavalla

$$A_v = \frac{A_0 h_0}{b_0 + h_0} \quad (3.19)$$

missä h_0 on parresauvan korkeus. Parresauvan leikkauspinta-alaksi saadaan 2322,13 mm². Sijoittamalla arvo kaavaan (3.18), saadaan leikkauskestävyydeksi 737,37 kN. Koska leikkausvoiman suuruus on 543,20 kN, parresauva kestää leikkausrasituksen. Leikkauskestävyyden ja taivutusmomentin yhteisvaikutus tulee myös huomioida, koska $Q_0 > 0,5V_{pl.Rd}$ [9].

Taivutusmomentin ja leikkauskestävyyden yhteisvaikutuskestävyys lasketaan kaavalla

$$M_{v.Rd} = \left(W_{pl.0} - \frac{\rho A_v^2}{8t_0} \right) \times \left(\frac{f_{y.0}}{\gamma_{M0}} \right) \quad (3.20)$$

Kaava on standardin EN 1993-1-1 kaava 6.30 [9]. Kaavassa esiintyvä taivutusvastuksen pienennystekijä ρ lasketaan kaavalla

$$\rho = \left(\frac{2Q_{0.Ed}}{V_{pl.Rd}} - 1 \right)^2 \quad (3.21)$$

Kaavan (3.21) mukaan pienennystekijän ρ arvoksi saadaan 0,22. Kun sijoitetaan kaavaan (3.20) tunnetut arvot, saadaan taivutusmomentin ja leikkauskestävyyden yhteisvaikutuksen kestävyysarvoksi 132,69 kNm, joten yhteisvaikutuskestävyys on riittävä, koska taivutusmomentin arvo on 73,80 kNm.

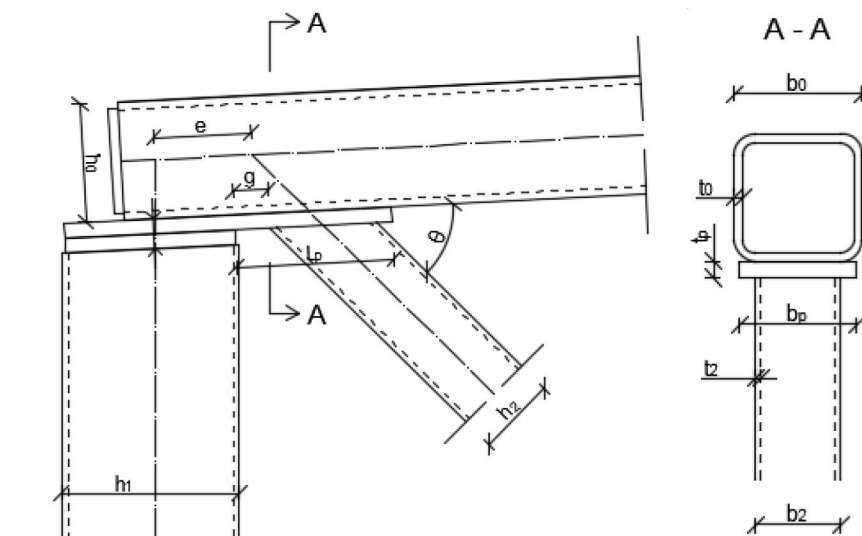
Voisi sanoa, että yläpaarteen poikkileikkauskestävyys tuella on riittävä, koska paarteen puristuskestävyys 2554,34 kN on suurempi kuin puristusvoima 12,20 kN, taivutuskestävyys 143,08 kNm suurempi kuin taivutusmomentti 73,80 kNm, leikkauskestävyys 737,37 kN suurempi kuin leikkausvoima 543,20 kN sekä leikkausvoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutuskestävyys 132,69 kNm on suurempi kuin taivutusmomentti 73,80 kNm.

3.2 Vahvistettu yläpaarteen ja diagonaalin välinen liitos

Tässä luvussa käsitellään kuvan 7 mukainen liitos, jossa yläpaarteen ja diagonaalin välinen liitos on vahvistettu levyosalla. Rakenneosien rasitukset on määritetty SCIA Engineer 16.1 -ohjelmalla [4] tietyille kuormille. Tarkemmat laskelmat on esitetty liitteessä 2.

3.2.1 Lähtötiedot ja rasitukset

Kuvassa 11 on esiteltynä mitoitettava liitoskokonaisuus. Mitoituksessa yläpaarteen materiaalina on käytetty teräslaattaa S550MH ja diagonaalin materiaalina teräslaattaa S420MH. Vahvikelevyn materiaali on S550MH. Pilarin materiaali ei vaikuta tämän mitoituksen tulokseen, mutta mainittakoon, että sen on ajateltu olevan teräslaattaa S420MH.



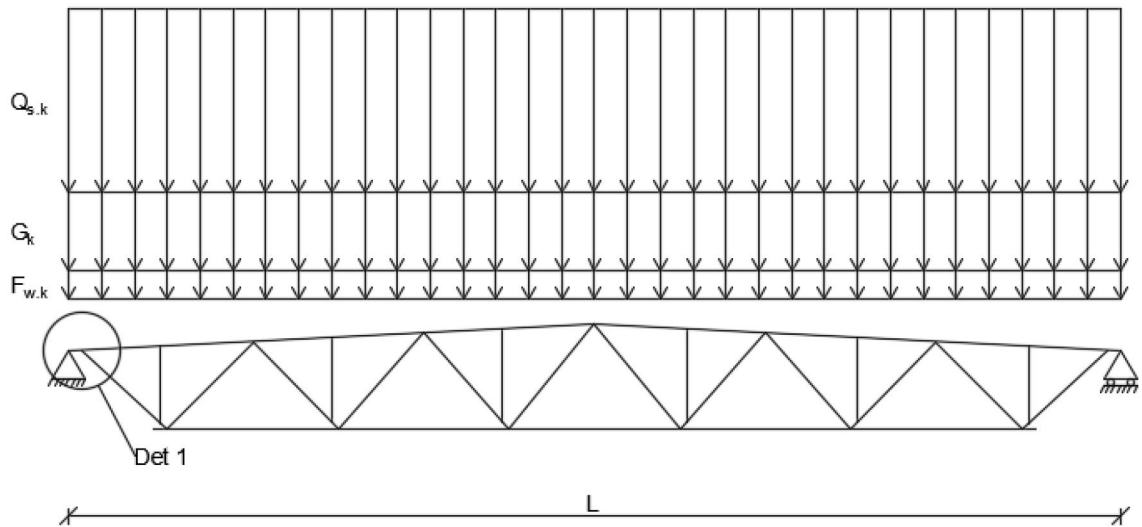
Kuva 11 Mitoitettava liitos

Taulukko 3 sisältää liitoksen eri osien parametrit. Liitokseen liittyvien osien ehdot mitoitukselle sekä vapaavälin ehdot ovat annettu standardissa EN 1993-1-8 [1]. Tämän laskennan osalta ehtojen toteutuminen on tutkittu ja esitelty liitteessä 2, josta käy myös ilmi, että paarteen ja diagonaalin välinen liitos mitoitetaan Y-liitoksena. Kaikki rakeneosat kuuluvat poikkileikkausluokkaan 1 liitteen 2 mukaisesti.

Taulukko 3 Liitoksen parametrit

Suure	Selite	Suuruus
h_0 [mm]	Paarteen korkeus	140
b_0 [mm]	Paarteen leveys	140
t_0 [mm]	Paarteen seinämäpaksuus	6
h_1 [mm]	Pilarin korkeus	250
h_2 [mm]	Diagonaalin korkeus	100
b_2 [mm]	Diagonaalin leveys	100
t_2 [mm]	Diagonaalin seinämäpaksuus	5
e [mm]	Epäkeskisyys	135
g [mm]	Vapaaväli	25
α [°]	Yläpaarteen kaltevuus	1,4
θ [°]	Diagonaalin liittymiskulma	33
A_0 [mm ²]	Paarteen poikkipinta-ala	3123,29
$W_{el,0}$ [mm ³]	Paarteen kimmoteorian mukainen taivutusvastus	131490
$W_{pl,0}$ [mm ³]	Paarteen plastisuusteorian mukainen taivutusvastus	155330
b_p [mm]	Vahvikelevyn leveys	170
L_p [mm]	Vahvikelevy pituus	300
t_p [mm]	Vahvikelevyn paksuus	20
$f_{y,p}$ [MPa]	Vahvikelevyn myötöraja	550
$f_{u,p}$ [MPa]	Vahvikelevyn murtolujuus	600

Kuvassa 12 on esiteltynä ristikon rakenne ja yläpaarteeseen kohdistuvat kuormitukset, joilla liitoksessa olevat rasitukset ovat laskettu. Kuvan osoittama detajli 1 esittää käsiteltävän liitoksen sijaintia.

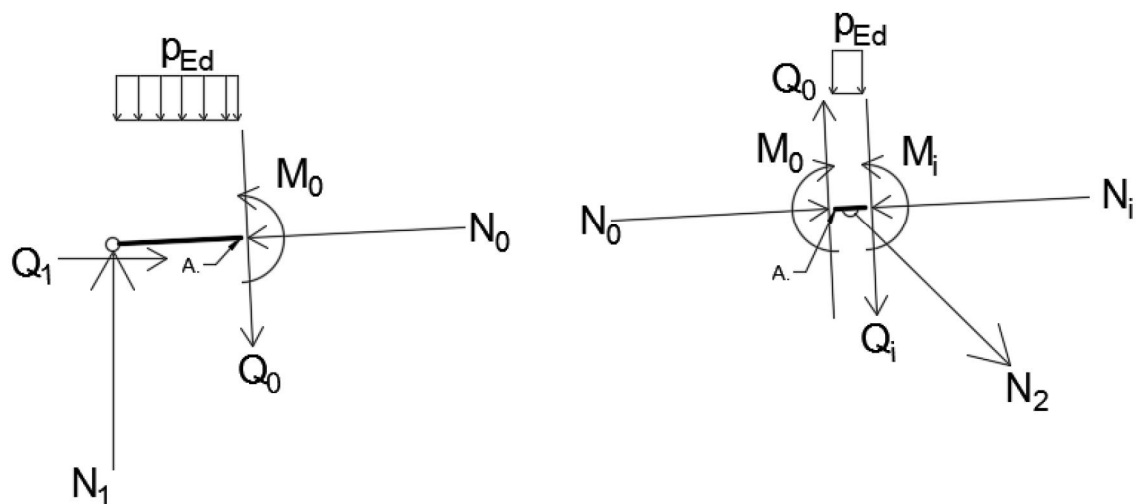


Kuva 12 Ristikon topologia, kuormat ja liitoksen sijainti

Taulukko 4 sisältää kuvan 12 osoittamat ristikon kuormitukset sekä liitoksen rasitukset. Liitoksen rasitukset on saatu kaavan (3.22) mukaan lasketun kokonaiskuormituksen perusteella [5]:

$$p_{Ed} = 1,15K_{FI}G_k + 1,15K_{FI}G + 1,5K_{FI}Q_{s,k} + 1,5K_{FI}\psi_0F_{w,k} \quad (3.22)$$

jossa K_{FI} seuraamusluokasta riippuva kuormakerroin ja se on tässä tapauksessa 1,0 seuraamusluokan ollessa CC2. Kaavan kertoimet tulevat Suomen kansallisesta liitteestä [6]. Tuulikuorman yhdistelykerroin $\psi_0 = 0,6$. Kaava (3.22) sekä kuormakerroin ja tuulen yhdistelykerroin on saatu lähteestä [7]. Kaavan (3.22) mukaan kokonaiskuormitukseksi p_{Ed} saadaan 30,41 kN/m. Taulukko 4 sisältää kaavassa käytetyt kuormat.



Kuva 13 Mitoitettavan liitoksen vapaakappalekuva

Taulukko 4 Ristikön kuormitukset ja rasitukset

Suure	Selite	Suuruus
$Q_{s,k}$ [kN/m]	Lumikuorma	14
G [kN/m]	Ristikön omapaino	0,54
G_k [kN/m]	Katon omapaino	6
$F_{w,k}$ [kN/m]	Tuulikuorma	2,1
p_{Ed} [kN/m]	Kokonaiskuorma	30,41
N_0 [N]	Paarteen normaalivoima	7700
N_1 [N]	Pilarin normaalivoima	365000
N_2 [N]	Diagonaalin normaalivoima	649900
Q_0 [N]	Paarteen leikkausvoima	361700
M_0 [kNm]	Paarteen taivutusmomentti	38,10

Kuvan 13 osoittamien nuolien mukaisesti paarteen normaalivoima on puristusta, pilarin normaalivoima puristusta ja diagonaalin normaalivoima vetoa.

3.2.2 Yläpaarteen ja diagonaalin liitos

Paarteen pinnan kestävyys lasketaan kaavojen (3.2) - (3.8) avulla. Sijoittamalla arvot kaavaan (3.2), pinnan kestävyudeksi saadaan 484,64 kN. Koska diagonaalin aiheuttama vetorasitus $N_2 = 649,90$ kN, paarteen pinta ei kestä rasitusta ja se joudutaan vahvistamaan levyosalla.

Vahvistetun liitoksen levyosalle on määrätty voimassaoloehdot standardissa EN 1993-1-8 [1]. Sen lisäksi, että levyosan tulee olla vähintään yhtä lujaa materiaalia kuin parresauva, tulee levyosan täyttää seuraavat ehdot:

$$b_p \geq b_0 - 2t_0 \quad (3.23)$$

$$t_p \geq 2t_2 \quad (3.24)$$

$$L_p \geq \frac{h_2}{\sin \theta} \times \sqrt{b_p(b_p - b_2)} \quad (3.25)$$

joissa b_p on levyn leveys, t_p levyn paksuus ja L_p levyn pituus. Nämä ehdot täyttyvät annetuilla lukuarvoilla (kts. Taulukko 3).

Paarteen pinnan osalta vahvistetun liitoksen kestävyys lasketaan kaavalla

$$N_{Rd} = k_k \times \frac{\frac{f_{yp} t_p^2}{(1 - \beta_p) \sin \theta} \times \left(\frac{2\eta_p}{\sin \theta} + 4\sqrt{1 - \beta_p} \right)}{\gamma_{M5}} \quad (3.26)$$

missä tekijä β_p lasketaan kaavalla

$$\beta_p = \frac{b_2}{b_p} \quad (3.27)$$

ja tekijä η_p kaavalla

$$\eta_p = \frac{h_2}{b_p} \quad (3.28)$$

Kaava (3.26) on standardin EN 1993-1-8 taulukossa 7.17 nimellä ”vetokuormitus” [1]. Sijoittamalla lasketut ja tiedetyt arvot kaavaan (3.26), saadaan paarteen pinnan kestävyden mitoitusarvoksi 3709,59 kN, joka on rasitusvoimaa N_2 suurempi ja tällöin paarteen pinta kestää vahvistettuna.

Paarteen pinnan lävistysleikkautumisen mitoituskestävyys lasketaan kaavalla

$$N_{Rd} = k_k \times \frac{\frac{f_{yp} t_p}{\sqrt{3} \sin \theta} \times \left(\frac{2h_2}{\sin \theta} + 2b_{e,p} \right)}{\gamma_{M5}} \quad (3.29)$$

missä esiintyvä tehollinen leveys $b_{e,p}$ lasketaan kaavalla

$$b_{e,p} = \min \left(\frac{10}{b_p / t_p} \times b_2, b_2 \right) \quad (3.30)$$

Kaava on standardin EN 1993-1-8 taulukossa 7.11 nimellä ”lävistysleikkautuminen”, johon on vaihdettu vahvistetun liitoksen mukaiset määreet kyseisen standardin taulukon 7.17 mukaisesti [1]. Teholliseksi leveydeksi saadaan kaavan (3.30) avulla 100 mm. Sijoittamalla arvot kaavaan (3.29), saadaan paarteen pinnan lävistysleikkautumisen kestävyudeksi 5291,29 kN. Uumasauvan normaalivoima $N_2 = 649,90$ kN, joten paarteen pinta kestää vahvistettuna.

Paarteen uumia ei ole vahvistettu levyllä. Tästä syystä paarteen uuman lommahtamisen kestävyys lasketaan samalla kaavalla, kuin edellisessä laskentaesimerkissä, eli kaavalla (3.11). Sijoittamalla lukuarvot kaavaan saadaan paarteen uuman lommahtamisen kestävyysarvoksi 2070,82 kN. Uumasauvan normaalivoima $N_2 = 649,90$ kN, joten paarteen uuma kestää vahvistamattomana.

Uumasauvan kestävyys paarteen pinnan ollessa vahvistettu määritetään kaavalla (3.12), mutta paarteen pinnan osalta vahvistetun liitoksen tapauksessa uumasauvan tehollinen leveys määritetään kaavalla

$$b_{eff} = \min \left(\frac{10}{b_p/t_p} \times \frac{f_{yp}t_p}{f_{y2}t_2} \times b_2, b_2 \right) \quad (3.31)$$

Kaavaan (3.31) sijoittamalla saadaan teholliseksi leveydeksi 100 mm. Kun sijoitetaan lukuarvot kaavaan (3.12), saadaan uumasauvan murtumisen kestävyysarvoksi 651,00 kN ja tämä on suurempi kuin uumasauvan normaalivoima 649,90 kN, joten liitos kestää kyseisen tapauksen.

Paarteen pinnan kestävyysmitoitussarvo vahvistettuna on 3709,59 kN, pinnan lävisyleikkautumisen kestävyysmitoitussarvo 5291,29 kN, paarteen uuman kestävyysmitoitussarvo 2070,82 kN ja uumasauvan kestävyysmitoitussarvo 651,00 kN. Koska uumasauvan normaalivoima 649,90 kN on jokaista edellä mainittua kestävyyttä pienempi, liitos kestää vahvistettuna.

3.2.3 Yläpaarteen kestävyys tuella

Yläpaarteen kestävyys tuella määritetään samalla tavalla kuin kohdassa 3.1.3, jossa yläpaarteen kestävyys määritetään vahvistamattomalle liitokselle. Laskenta pysyy samana, koska uumasauvan ja paarteen välisen liitoksen vahvistaminen ei vaikuta paarteen ja pilarin väliseen liitokseen.

Yläpaarretta rasittaa vastaavat voimat kuin kohdan 3.1.3 tapauksessa, mutta voimien suuruudet eroavat toisistaan. Taulukko 4 sisältää tämän tapauksen voimien suuruudet. Taulukosta nähdään normaalivoiman N_0 , leikkausvoiman Q_0 sekä taivutusmomentin M_0 suuruudet.

Puristuskestävyyden mitoitussarvo lasketaan kaavalla (3.14). Mitoitusarvoksi saadaan 1717,81 kN, joka on huomattavasti suurempi kuin normaalivoima N_{Ed} . Koska kaavat (3.15) ja (3.16) toteutuvat, ei taivutuksen ja normaalivoiman yhteisvaikutusta tarvitse ottaa huomioon [9].

Taivutuskestävyyden mitoitussarvo määritetään kaavan (3.17) avulla. Koska paarre kuuluu poikkileikkausluokkaan 1 (kts. liite 2), voidaan taivutusvastuksena käyttää plastisuusteorian mukaista taivutusvastusta [9]. Kaavalla (3.17) saadaan taivutuskestävyyden mitoitussarvoksi 85,43 kNm. Taivutusmomenttia paarteelle aiheutuu 38,10 kNm, joten paarre kestää taivutusmomentin osalta.

Leikkauskestävyyden mitoitussarvo määritetään kaavalla (3.18) ja laskennassa tarvittava paarteen leikkauspinta-ala kaavalla (3.19). Leikkauspinta-alaksi saadaan 1516,64 mm². Leikkauskestävyyden $V_{pl,Rd}$ mitoitussaroksi saadaan kaavan (3.18) avulla 495,89 kN. Koska leikkausvoiman V_0 suuruus on yli puolet plastisuusteorian mukaisen leikkauskes-

täyvyyden $V_{pl,Rd}$, täytyy leikkausvoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutus tarkastella [9].

Taivutuskestävyyden pienennystekijän arvoksi saadaan kaavan (3.21) mukaan 0,21 ja kaikki lukuarvot sijoittamalla kaavaan, taivutuskestävyyden pienennetyksi mitoitusarvoksi saadaan 79,55 kNm kaavan (3.20) mukaisesti. Taivutusmomentin mitoitusarvo on tätä pienempi, joten paarre kestää taivutusmomentin ja leikkausvoiman yhteisvaikutuksen.

Yläpaarteen kestävyys tuella on riittävä, koska paarteen puristuskestävyys 1717,81 kN on normaalivoimaa 7,70 kN suurempi, taivutuskestävyys 85,43 kNm taivutusmomenttia 38,10 kNm suurempi, leikkauskestävyys 495,89 kN leikkausvoimaa 361,70 kN suurempi sekä leikkausvoiman pienentämä taivutuskestävyys 79,55 kNm taivutusmomenttia 38,10 kNm suurempi.

4. LIITOKSEN KOLMIULOTTEINEN FEM-MALLINNUS

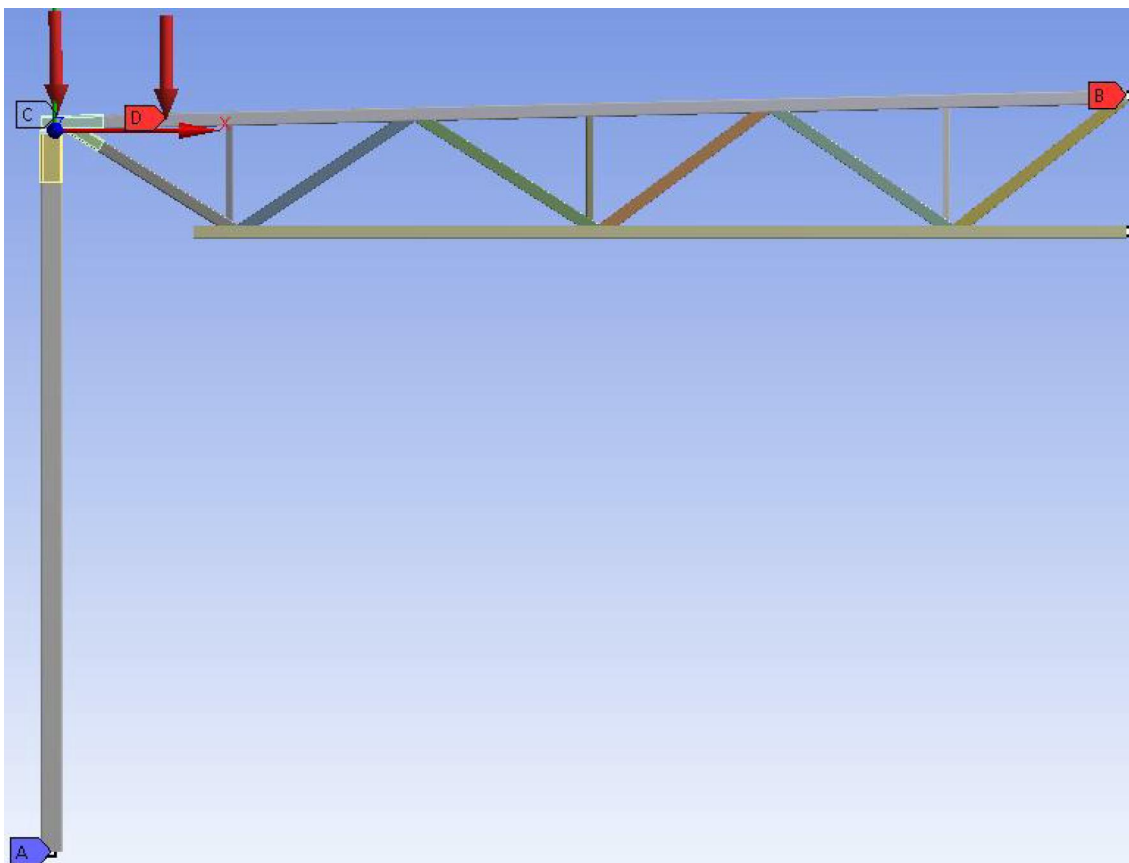
Tässä luvussa esitellään kolmiulotteisia FEM-malleja, niistä nähtäviä tuloksia ja havain-
toja. FEM-mallinnus tehtiin Ansys 18.0 ohjelmalla [12], johon geometria luotiin Ansys-
sen omalla SpaceClaim -mallinnusohjelmalla. Eri mallien tuloksia havainnollistetaan
ohjelmasta otetuilla kuvakaappauksilla, joista näkyy rakenneosien von Mises -
jännitysjakaumia, taipumia sekä muodonmuutoksia. Esiteltävinä liitoksina ovat tässä
työssä esiteltyt kaksi liitosta, joista toisessa yläpaarteen ja diagonaalin välinen liitos on
vahvistamaton ja toisessa vahvistettu. Kyseisten mallien vertailutulokset sauvamalleilla
esitetään seuraavassa kappaleessa sekä lisäksi tulokset ovat liitteessä 5. Liitteessä 8 on
nähtävissä useamman erilaisen FEM-mallin kuvat, jotka ovat vastaavia liitoksia kuin
tässä osassa esiteltävä liitokset. Liitoksissa muuttuvat ainoastaan mittasuhteet.

4.1 Mallin esittely ja reunaehdot

Liitos on mallinnettu solidielementeillä käyttämällä hex dominant -metodia, jossa käy-
tettävät elementit ovat pääasiassa kuusikulmioita, mutta joka sisältää myös särmiöitä
sekä nelitahokkaita. Tässä tutkimuksessa kuusikulmiot ovat 20-solmuisia SOLID186 -
elementtejä ja nelitahokkaat 10-solmuisia SOLID187 -elementtejä. Kuusikulmioita ja
nelitahokkaita on myös sellaisia, joissa solmut ovat ainoastaan elementtien nurkissa,
mutta tässä työssä on käytetty elementtejä, joissa solmuja on myös nurkkapisteen vä-
leillä. Tutkimuskohteena on ainoastaan liitosalue. Malliin on luotu myös ristikon puoli-
kas sekä pilari sauvaelementeillä, jotka tässä tutkimuksessa ovat 2-solmuisia BEAM188
-elementtejä. Tällä tavalla mallintamalla liitokselle tulevat rasitukset on saatu mahdolli-
simman tarkasti vastaamaan todellista kuormitustilannetta. [13]

Kuvassa 14 nähtävään pisteeseen A on luotu pilarille kiinteä tuki ja kohtaan B on luotu
symmetria-akseli. Symmetria-akseli on ristikon puolivälissä. Symmetria-akselin suhteen
malli käyttäytyy yhtenevällä tavalla akselin molemmin puolin, joten sen avulla riittää
kuin mallinnus tehdään vain sen toiselle puolelle. Kohdissa C ja D olevat nuolet esittä-
vät ristikolle luotuja kuormituksia, joita tässä tapauksessa vaikuttaa ainoastaan yläpaar-
teeseen. Solidielementin alueelle kuorma määritetään painekuormana vaikuttamaan ko-
ko yläpaarteen yläpintaan. Sauvaelementin alueelle kuormitus määritetään viivakuor-
mana vaikuttamaan koko yläpaarteen matkalle. Kuvan kohdassa C oleva nuoli esittää
solidielementtialueella vaikuttavaa kuormaa ja kohdassa D oleva nuoli sauvaelementtien
alueella vaikuttavaa kuormaa.

Siirtymien reunaehdot mallissa toteutuvat tukien ja symmetria-akselin avulla. Pilarin alapäässä kohdassa A oleva kiinteä tuki estää pilarin alapään siirtymisen mutta yläpää voi vapaasti liikkua. Kohdassa B oleva symmetria-akseli estää akselin kohdalla sivusuuntaisen liikkumisen, mutta pystysuunta voi liikkua vapaasti ristikkorakenteen taipumisen puitteissa. Kun kaikki osat on sidottu toisiinsa, mallista tulee stabiili.

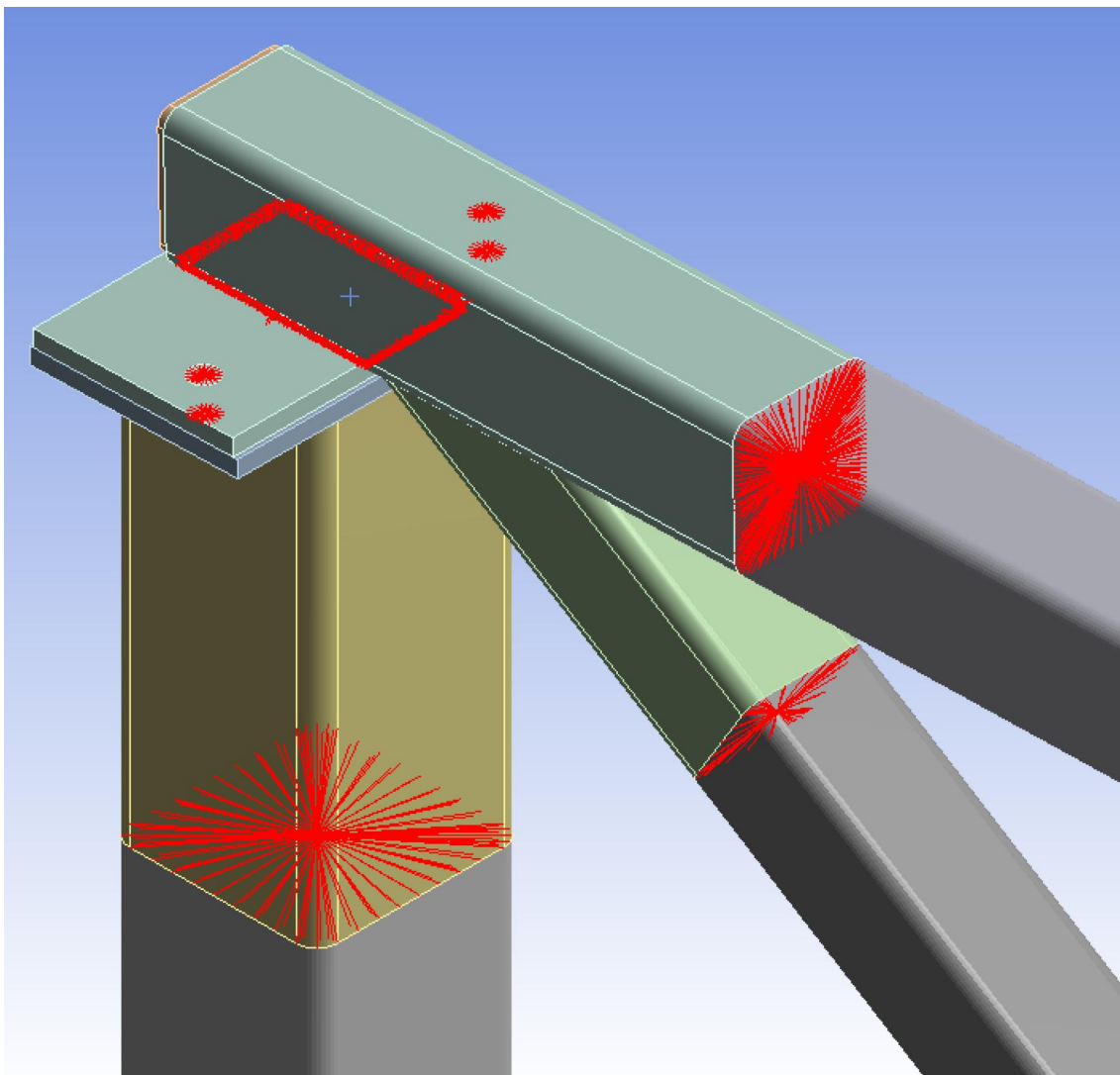


Kuva 14 FEM-mallin yleiskuva

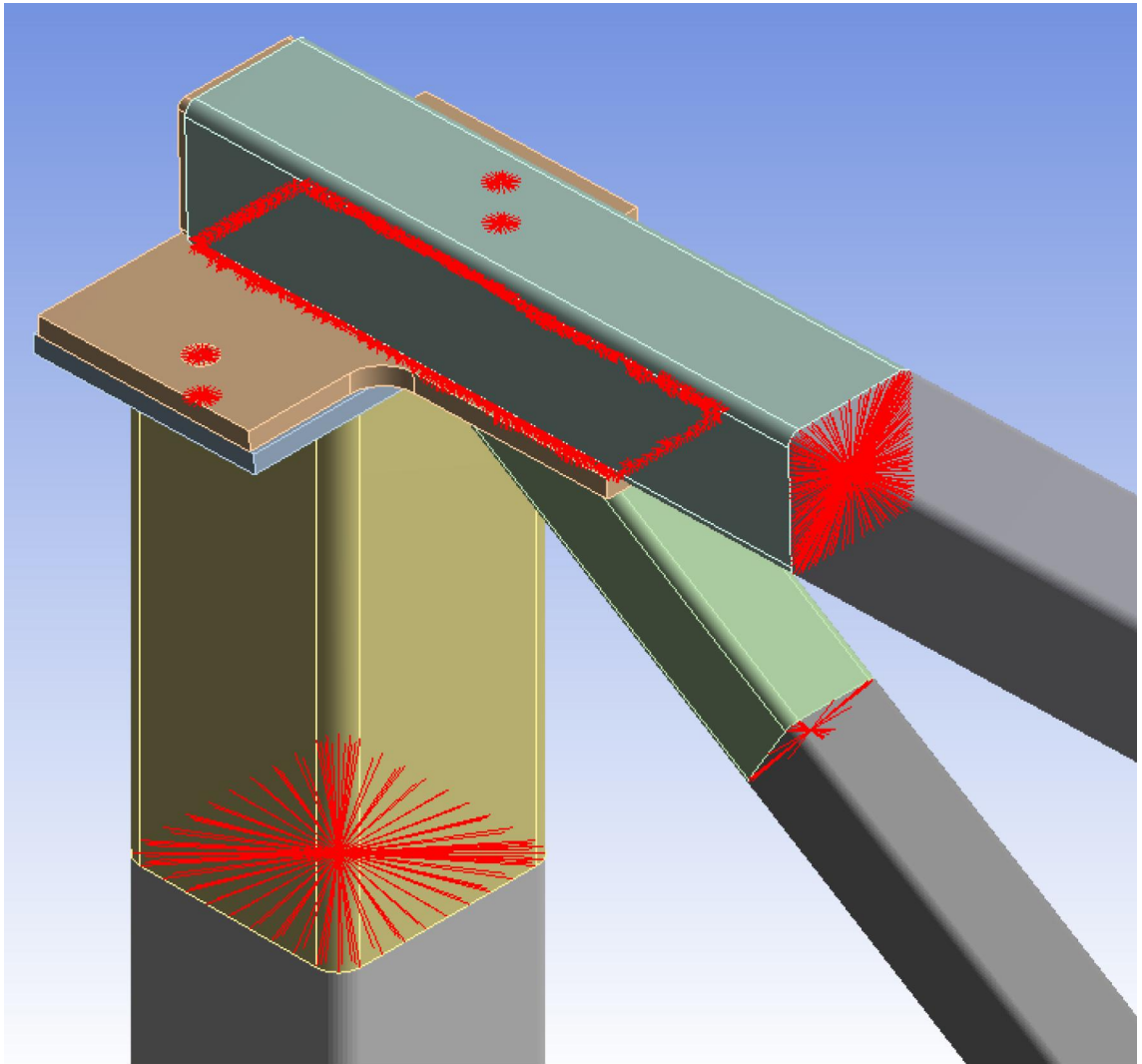
Kuvassa 15 on esitetty vahvistamattoman liitoksen liitosalueen kontaktit toisiinsa sekä sauvaelementteihin. Punaisten alueiden mukaisesti sauvaelementtien päätysolmut on sidottu kiinteästi solidielementtien katkaisukohdan jokaiseen solmuun, jolloin sauvat käyttäytyvät jatkuvina elementteinä. Yläpaarteen ja liitoslevyn välillä on punaisen alueen esittämällä alueella kontakti, jolloin liitos käyttäytyy kuten hitsattu sauma. Ruuvien kohdalla ylemmän liitoslevyn yläpinnan ja alemman liitoslevyn alapinnan välillä on kontakti alueella, joihin ruuvien kannat tukeutuvat. Liitoslevyjen välissä on kitkallinen liitos, jossa levyt eivät pääse painumaan toistensa läpi, mutta pystyvät sekä erkaantua että liukua toistensa lomitse. Kitkakertoimenä on käytetty teräs-teräs välisen voitelemattoman liitoksen kerrointa 0,15 [14]. Pilarin ja alemman liitoslevyn välillä olevaa liitosta ei näy kuvassa, mutta siinä on pilarin yläpään leikkauspinnan sekä liitoslevyn vastaavan kokoisen pinnan välillä kiinteä liitos. Yläpaarteen ja diagonaalin välillä on elementti-verkko jaettu, jolloin yläpaarre ja diagonaali käyttäytyvät samana osana. Jaettu element-

tiverkko tarkoittaa shared topology -komentoa Ansysissä [12], jossa kahden osan elementtiverkot tehdään yhtenäisiksi. Tällöin liitospintaa on vahvuudeltaan diagonaalien seinämävahvuuden verran.

Kuvassa 16 esitetään vahvistetun liitoksen liitosalueen kontaktit. Kontaktit ovat samantyyppiset kuin kuvan 15 liitoksessa lukuun ottamatta diagonaalien ja paarteiden välistä liitosta. Tässä ylemmän liitoslevyn sekä diagonaalien välillä on jaettu elementtiverkko, jolloin ne käyttäytyvät yhtenä osana. Liitoslevy on kuvan punaisen alueen mukaisesti kontaktissa paarteiden kanssa.

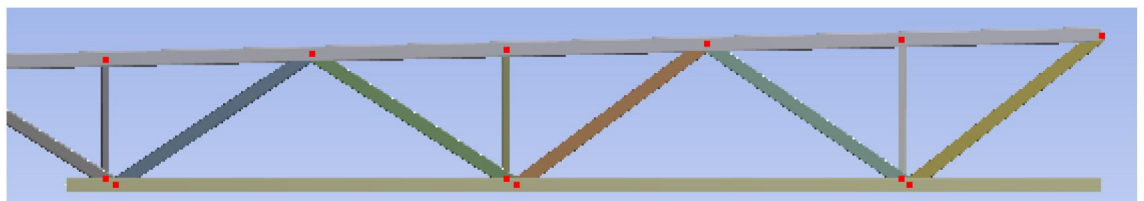


Kuva 15 Liitosalueen kontaktit vahvistamattomassa liitoksessa



Kuva 16 Liitosalueen kontaktit vahvistetussa liitoksessa

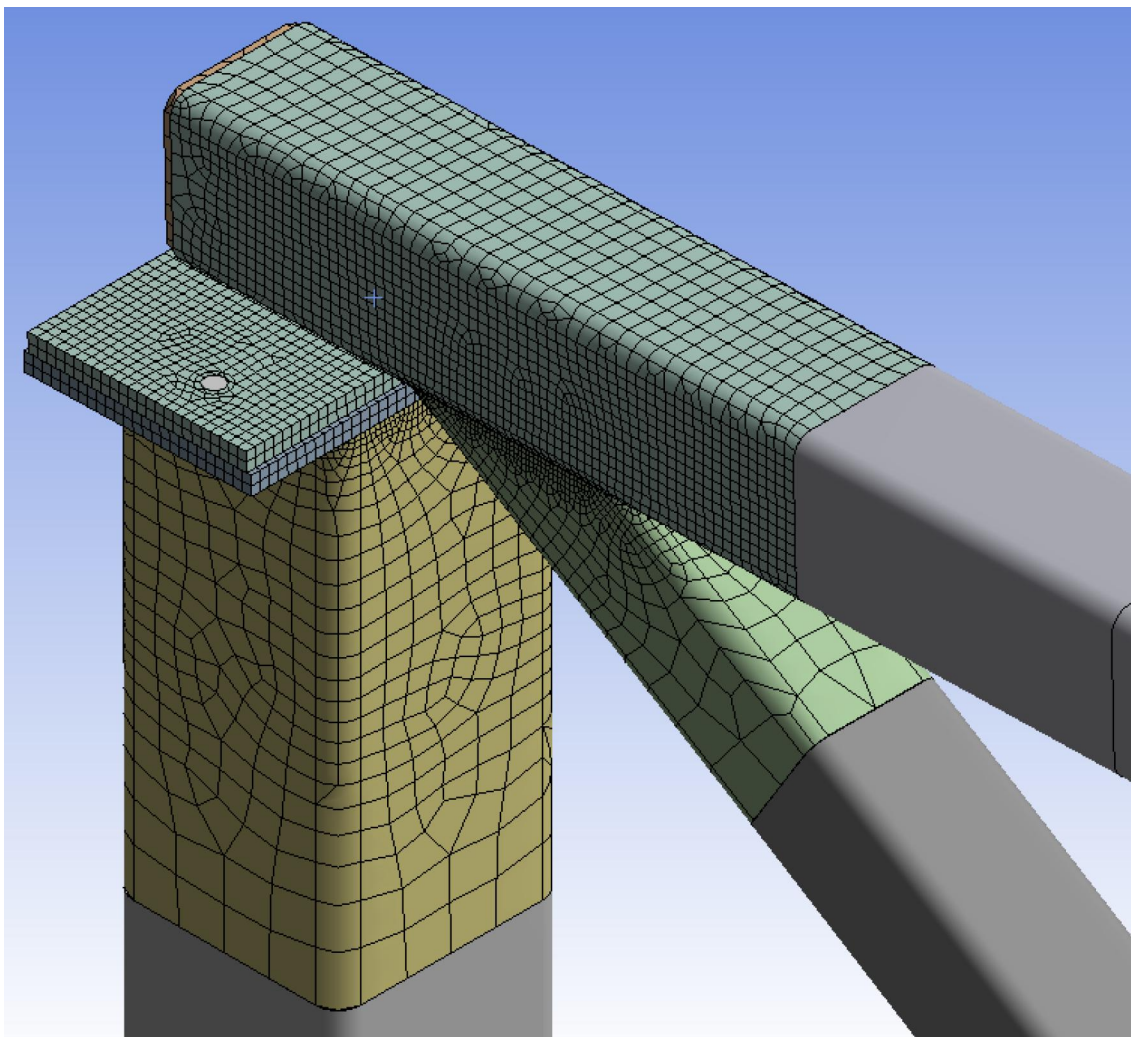
Kuvassa 17 esitetään ristikon sauvojen kontaktialueet. Jokainen uumasauva on liitetty nivelellisellä liitoksella paarteisiin sauvojen keskilinjoihin. Lisäksi vertikaalit on liitetty alapäästään nivelellisellä liitoksella diagonaalien keskilinjoihin.



Kuva 17 Ristikon kontaktit

Kuva 18 esittää liitosalueen elementtiverkkoa. Kaikkiin malleihin elementtiverkko on luotu noudattaen samaa periaatetta kuin kuvassa 18. Liitoksen kriittisimpiin kohtiin on

luotu muuta verkkoa tiheämpi verkko. Kriittisiä kohtia ovat pilarin yläpää, paarteen kyljet, liitoslevyt sekä diagonaalin ja yläpaarteen sauma.



Kuva 18 Liitosalueen elementtiverkko

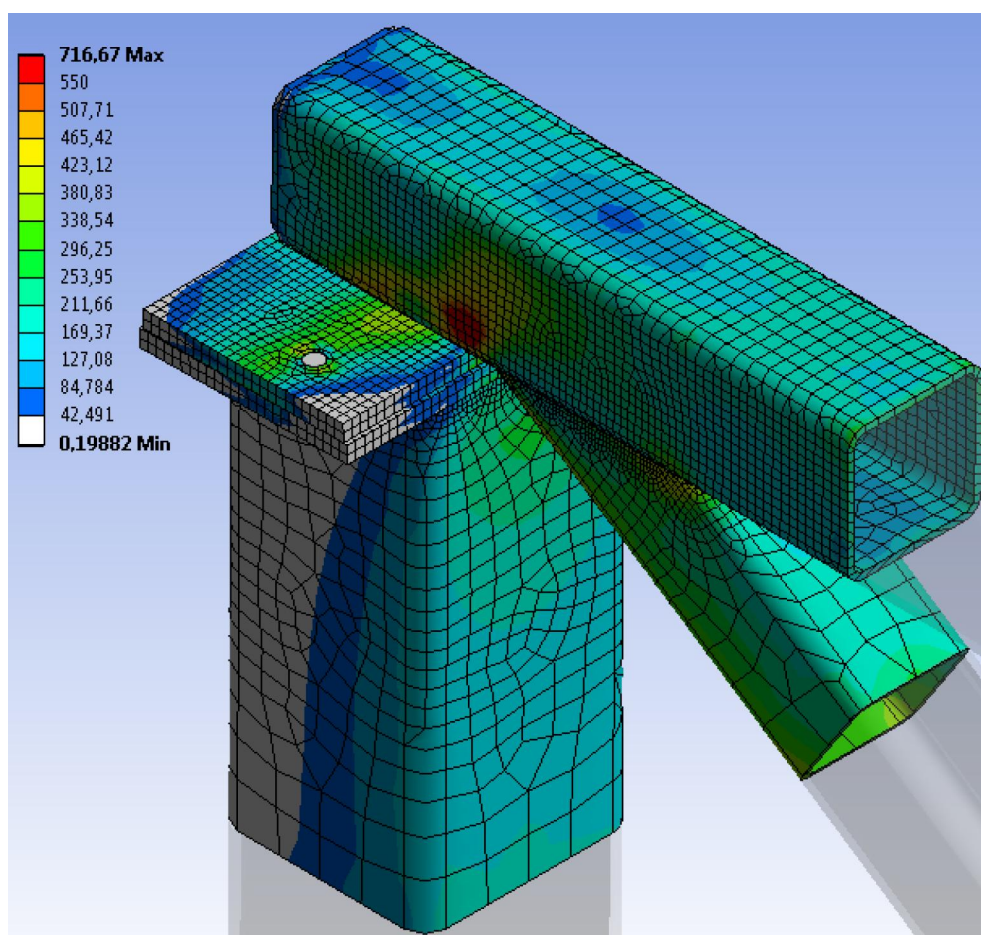
Kaikki liitokset ovat kuvien 14 - 18 kaltaisia, mutta jokaisen kontaktialueet ja elementtiverkot ovat uniikkeja erikokoisista profiileista johtuen. Elementtiverkon koko on todettu riittävän tarkaksi tihentämällä verkkoa kaksinkertaiseksi ja toteamalla, että tulokset eivät merkittävästi muutu. Materiaalimallina on käytetty bi-lineaarista kimmo-plastista materiaalia, joka on lineaarisesti myötölujeneva ja jonka tangentialmoduulina on käytetty arvoa $E/100$ [15], jossa E on materiaalin kimmomoduli. Laskennoissa geometrinen epälineaarisuus on otettu huomioon. Kyseiset kuvat ovat eräiden tässä työssä mallinnettujen liitosten kuvia ja ne esittävät mallin rakennetta ja periaatteita. Jokainen laskenta on tehty voimaohjattuna FEM-laskentana ja kaikki laskennat konvergoivat. Liitteessä 7 on esitetty kaikkien mallinnettujen liitosten parametrit.

4.2 Vahvistamaton yläpaarteen ja diagonaalin liitos

Tässä osassa esiteltävä liitos ja liitoksen analysoinnin tulokset käsittelevät samaa liitosta, joka on laskettu kohdissa 3.1 ja 6.1. Taulukko 5 sisältää kyseisen liitoksen parametritietoja sekä rasitukset. Tarkat tiedot liitoksen parametreista löytyy liitteestä 7. Paarteen materiaali on teräslaadultaan S550, diagonaalin S420 ja pilarin sekä liitoslevyjen S355. Tässä osassa esitetyt kuvat ovat Ansys 18.0 -ohjelmasta [12] otettuja kuvia.

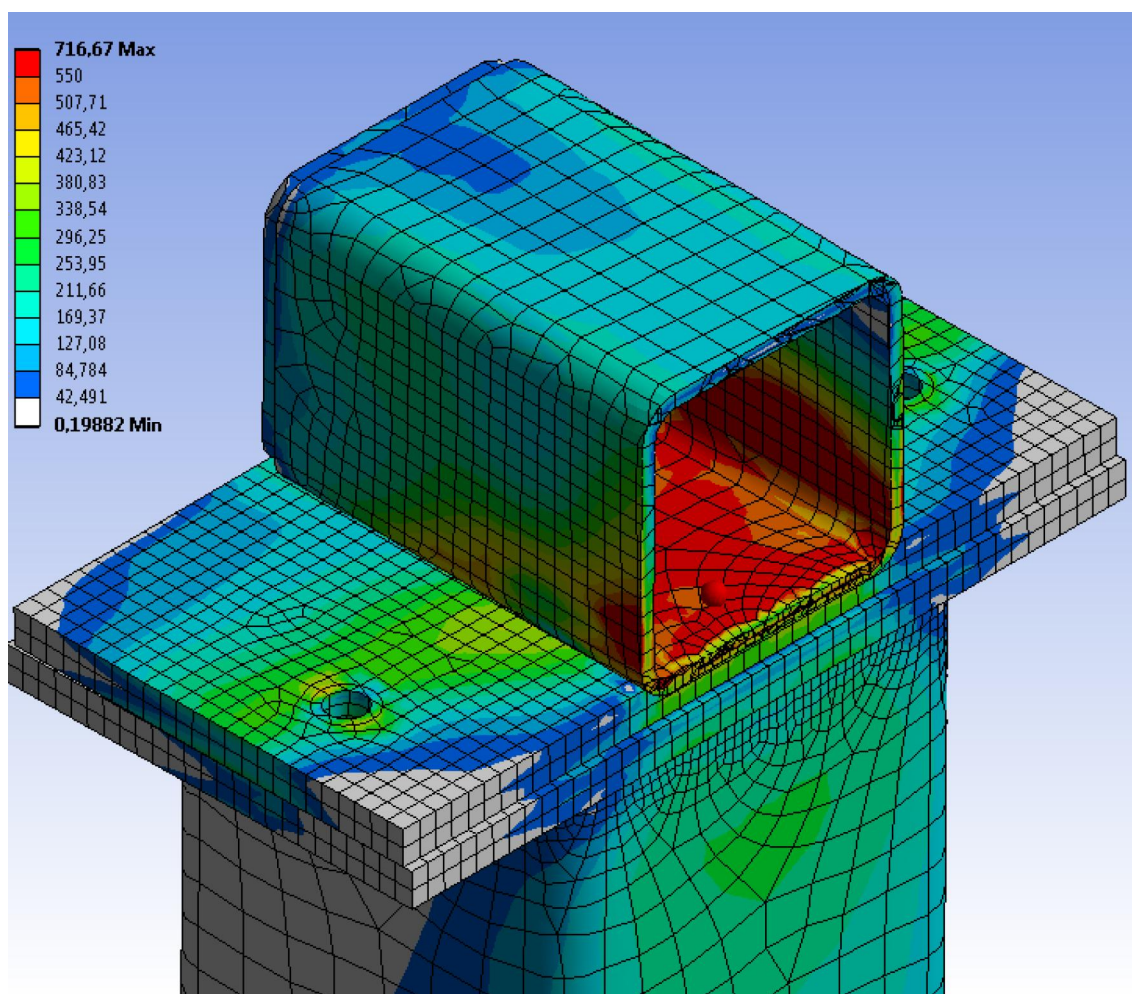
Taulukko 5 Liitoksen parametrit ja rasitukset

Suure	Selite	Suuruus
Profiili	Yläpaarre	160x160x8
Profiili	Diagonaali	140x140x7,1
Profiili	Pilari	250x250x10
Paksuus	Ylempi liitoslevy	20
Paksuus	Alempi liitoslevy	20
Halkaisija	Ruuvi	20
Kuormitus [MPa]	Yläpaarre, solidlelementti	0,38125
Kuormitus [kN/m]	Yläpaarre, sauvaelementti	45,75



Kuva 19 Liitoksen von Mises -jännitysjauma

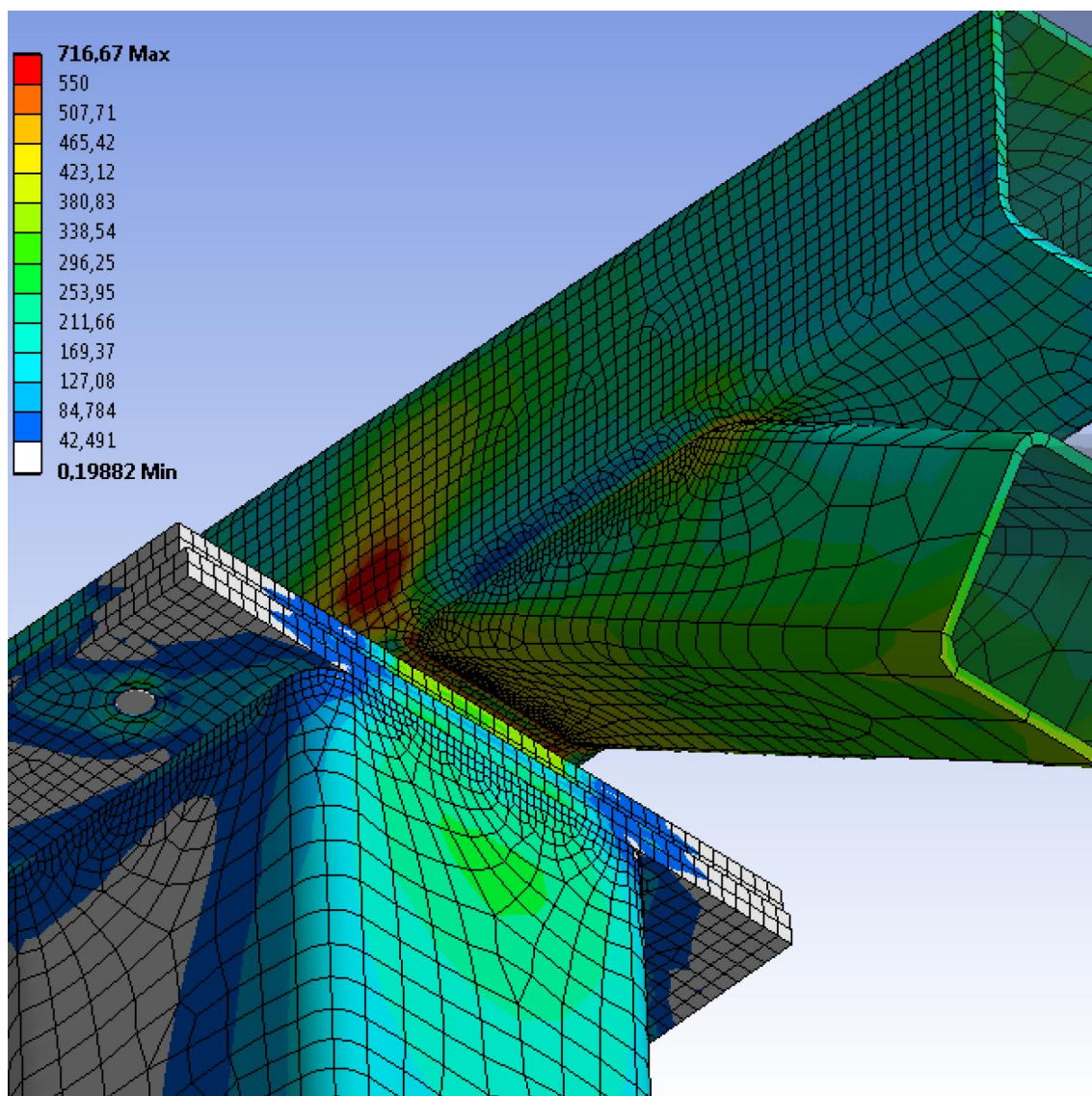
Kuvassa 19 näkyy liitoksen von Mises -jännitysjauma graafisena esityksenä. Kuvan vasemmassa reunassa näkyvät värien selitykset. Lukujen yksikkö on megapascal (MPa). Punaiset alueet esittävät kohtia, joissa jännitys on yli 550 MPa ja harmaat alueet kohtia, joissa jännitystä ei ole. Kuten kuvasta havaitaan, jännitykset pysyvät lähes kaikkialla alle 550 megapascalissa. Paarteen kyljissä liitoslevyn sisäreunan tasalla jännitys nousee pinnassa suuremmaksi kuin 550 MPa, mutta kuvan 20 mukaisesti jännitys ei ole paarteen paksuuden läpi niin suuri.



Kuva 20 Liitoksen von Mises -jännitysjauma, leikkaus

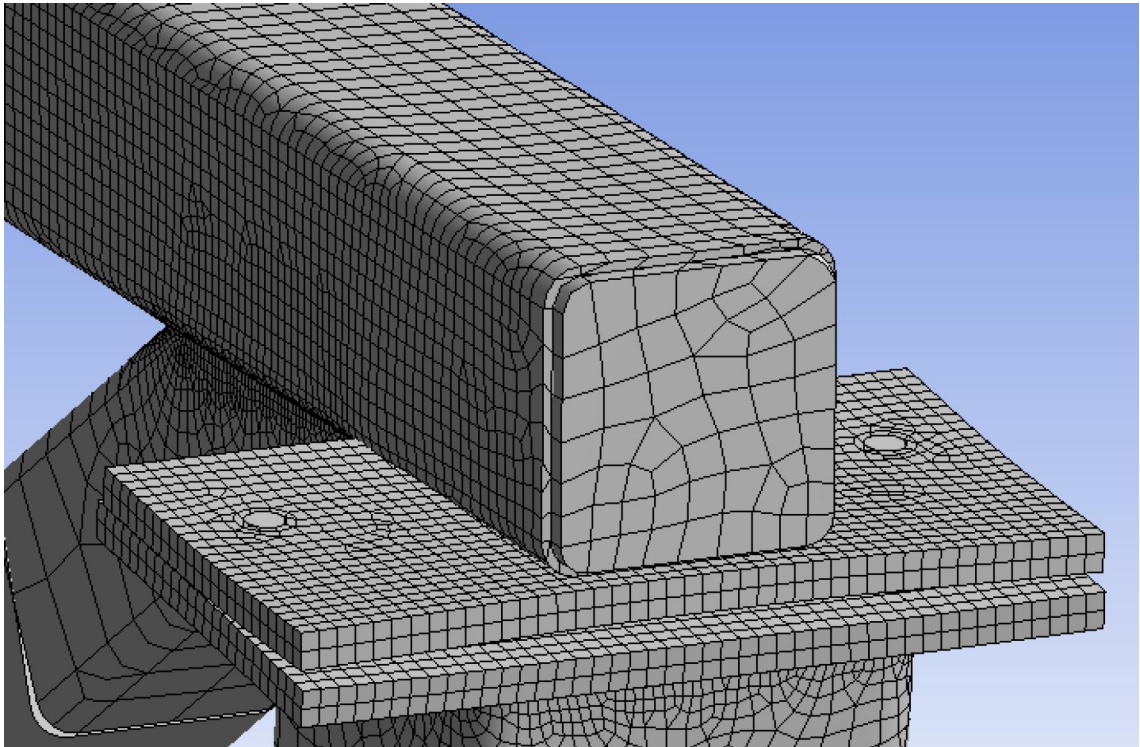
Kuvasta 20 huomataan, että jännitys on sekä paarteen ulkopinnassa, että paarteen sisäpinnassa yli 550 MPa, mutta jännitys ei nouse yhtä korkealle koko materiaalin paksuuden läpi. Tällöin siis rakenneosan pinnassa jännitys nousee korkeammaksi kuin materiaalin keskellä. Paarteen kyljissä paksuuden matkalla on vain yksi elementti, mutta alapinnassa on keskimäärin kaksi elementtiä, jolloin alapinnan jännitykset ovat tarkemmat kuin kylkien. Pinnoissa olevat korkeammat jännitykset selittyvät todennäköisesti kontaktien käyttäytymisellä. Näissä FEM-malleissa kontaktit ovat luotu vastaamaan mahdollisimman hyvin hitsisaumoja, mutta osat liittyvät kontakteilla toisiinsa vain rakenne-

osien pinnoista. Tällöin kuvan 20 tapauksessa diagonaali vetää parretta vain paarteen pinnasta ja aiheuttaa paarteen alalaipalle paikallisesti taivutusta. Ilmiöstä johtuen pintoihin muodostuu isompia jännityksiä. Todellisessa tilanteessa ilmiö ei ole yhtä voimakas, koska hitsatessa osat liittyvät toisiinsa muutenkin kuin vain pinnasta.



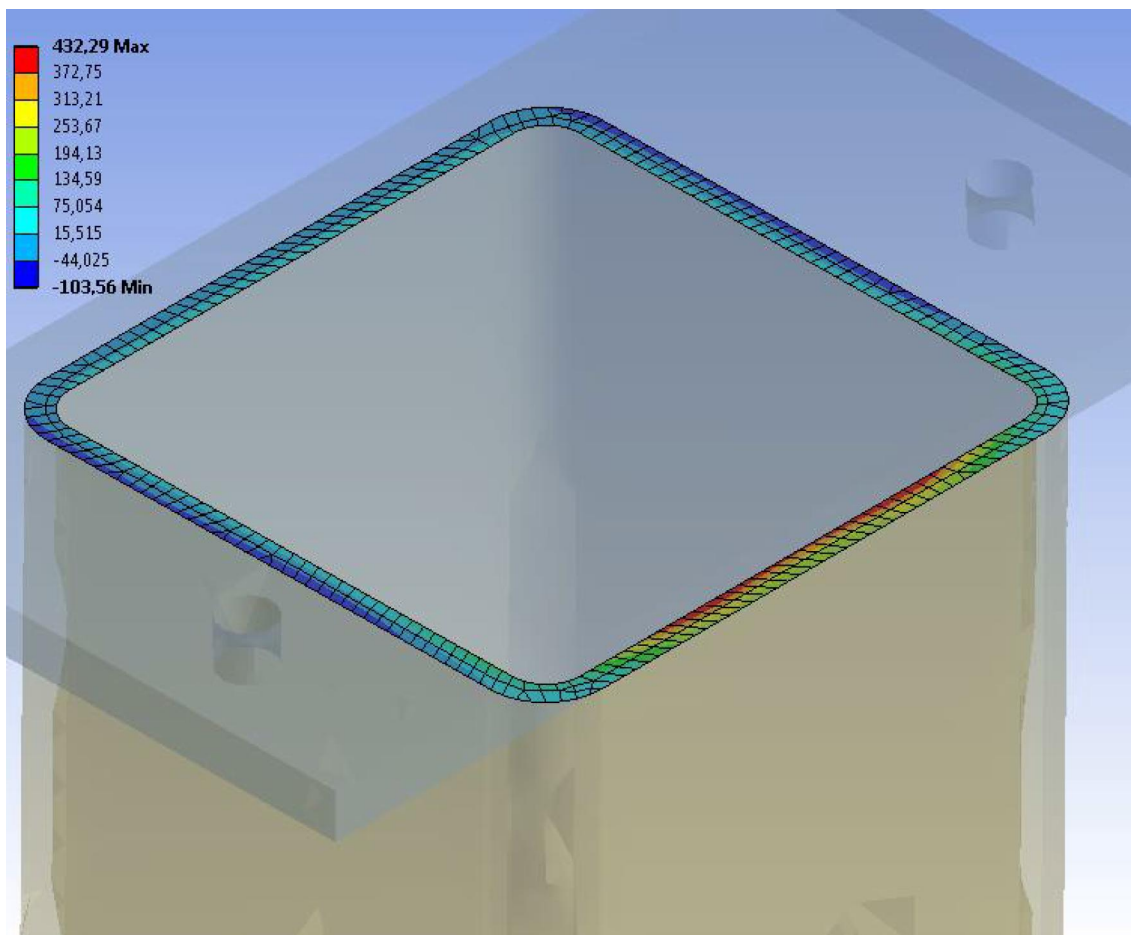
Kuva 21 Liitoksen von Mises -jännitysjakauma paarteen ja diagonaalin sauman kohdalla

Kuten kuvasta 21 huomataan, diagonaalin jännitys pysyy lähes kaikkialla alle 420 MPa, mikä on diagonaalin myötöraja. Paarteen ja diagonaalin sauman kohdalla jännitys ei nouse yli 550 MPa, joten diagonaalin ja paarteen liitos kestää kuvan mukaan ilman lisävahvistusta. Paarteen pinnalla diagonaalin nurkan kohdalla jännitys nousee hyvin lähelle 550 MPa:a, kuten kuvassa näkyvä oranssi alue osoittaa.



Kuva 22 Liitoslevyn taipuma

Kuvassa 22 esitetään liitoslevyn taipuma. Taipuma on skaalattu viisinkertaiseksi todelliseen taipumaan nähden, jotta levyjen käyttäytymisestä saa selvän kuvan. Taipumien perusteella voidaan tehdä oletus, jonka mukaan vain ylempi liitoslevy taipuu ja alempi pysyy kutakuinkin suorana. Tätä oletusta on käytetty työn luvussa 6. Liitoksessa oleviin ruuveihin muodostuu tässä tapauksessa yhteensä 179600 N vetovoimaa. Arvo on laskettu summaamalla yhteen ruuvien vetovoimat, jotka Ansys-ohjelma on antanut ruuveille. Luvussa 7 on esitelty uusien kehämallien avulla saatuja ruuvien vetovoimia ja niitä on verrattu FEM-analyysillä saatuihin ruuvivoimiin.



Kuva 23 *Pilarin päädyn von Mises -jännitys jakauma*

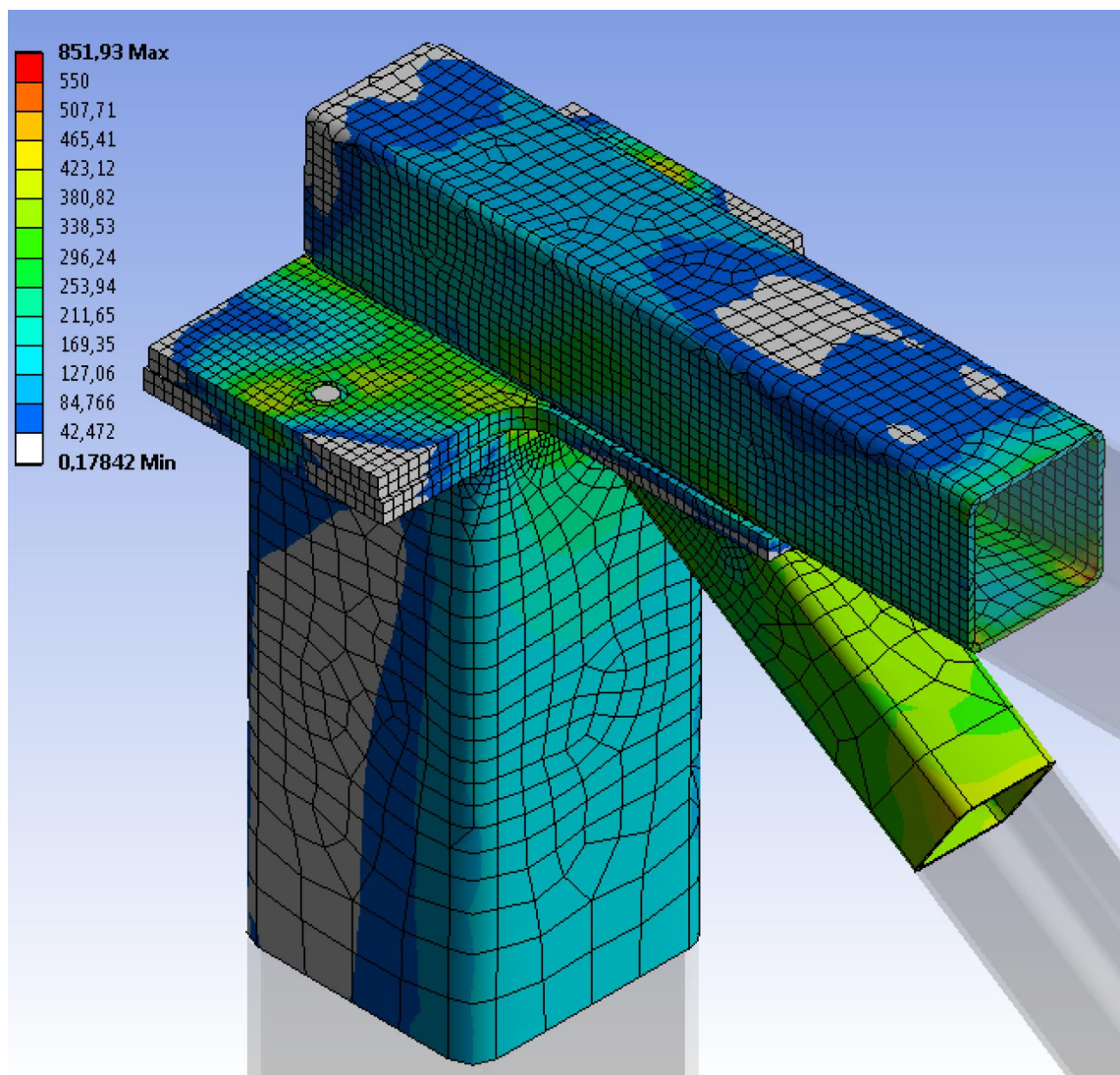
Kuvasta 23 nähdään, kuinka ristikolta pilarille tuleva jännitys jakautuu pilarin yläpäässä. Pilarin sisäreunan nurkkien alueella jännitys on jo hyvin pieni verrattuna pilarin sisäreunan keskialueelle. Jännitys jakauman mukaisesti rasitus kulkeutuu pilarille suurimmaksi osaksi pilarin sisäreunan kautta yläpaarteen leveyden matkalla.

4.3 Vahvistettu yläpaarteen ja diagonaalin liitos

Tässä luvussa esiteltävä liitos ja liitoksen analysoinnin tulokset käsittelevät samaa liitosta, joka on laskettu kohdissa 3.2 ja 6.2. Taulukko 5 sisältää kyseisen liitoksen parametritietoja sekä rasitukset. Tarkat tiedot liitoksen parametreista löytyy liitteestä 7. Paarteen materiaali on teräslaadultaan S550, diagonaalin S420 ja pilarin sekä liitoslevyjen S355. Tässä osassa esitetyt kuvat ovat Ansys 18.0 -ohjelmasta otettuja kuvia.

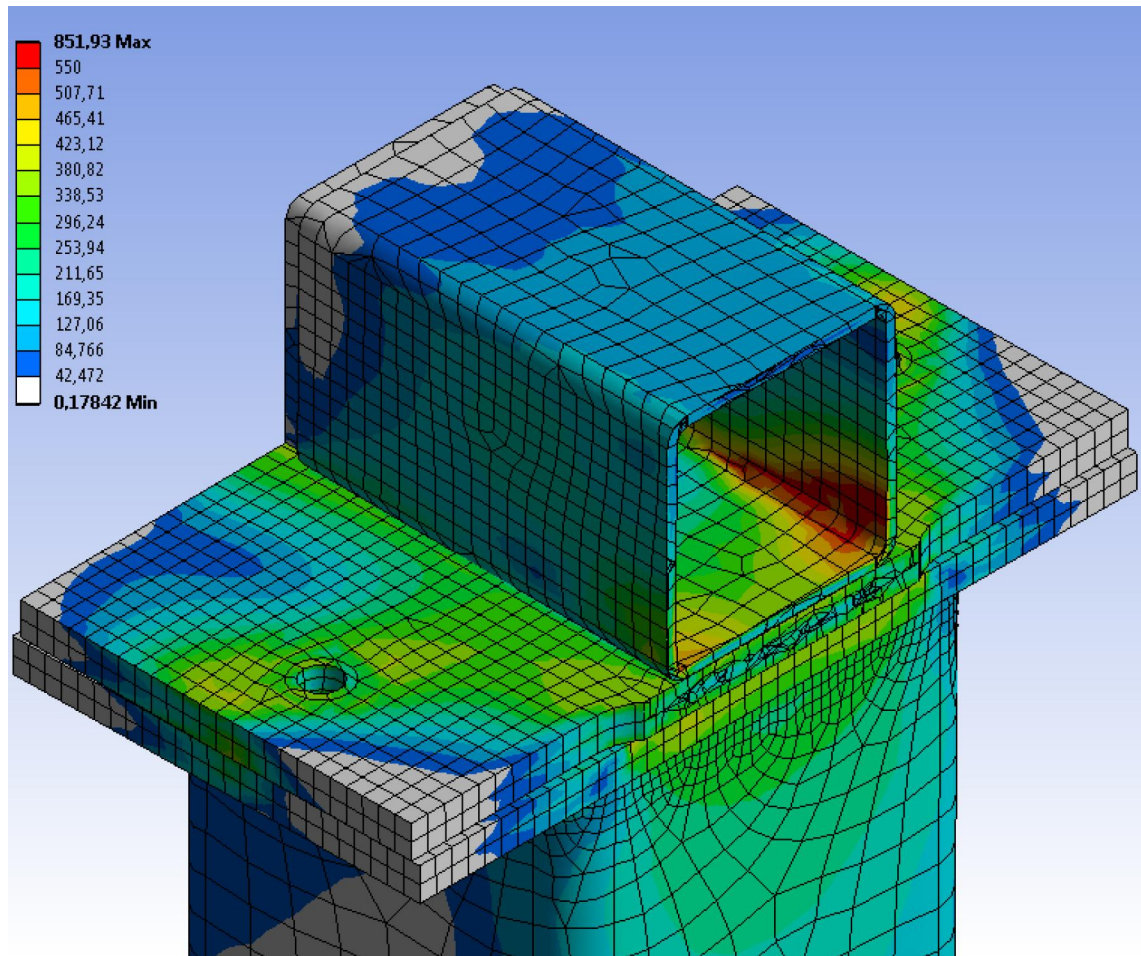
Taulukko 6 Liitoksen parametrit ja rasitukset

Suure	Selite	Suuruus
Profiili	Yläpaarre	140x140x6
Profiili	Diagonaali	100x100x5
Profiili	Pilari	250x250x10
Paksuus	Ylempi liitoslevy	20
Paksuus	Alempi liitoslevy	20
Halkaisija	Ruuvi	20
Kuormitus [MPa]	Yläpaarre, solidielementti	0,26198
Kuormitus [kN/m]	Yläpaarre, sauvaelementti	30,39

**Kuva 24** Liitoksen von Mises -jännitysjaakauma

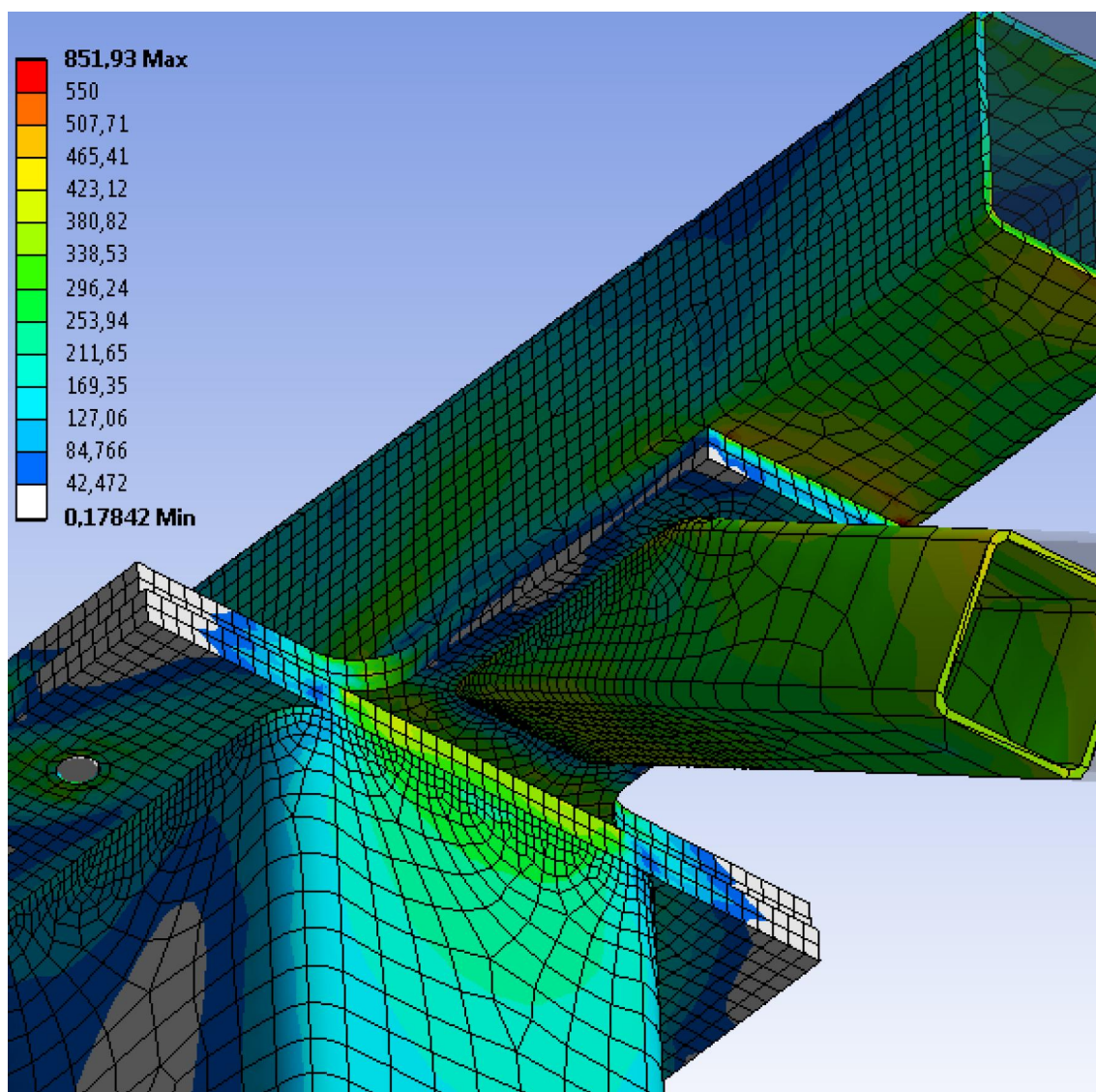
Kuvassa 26 näkyy liitoksen jännitysjaakauma graafisena esityksenä. Kuvan vasemmassa reunassa näkyvät värien selitykset. Lukujen yksikkö on megapascal (MPa). Punaiset

alueet esittävät kohtia, joissa jännitys on yli 550 MPa ja harmaat alueet kohtia, joissa jännitystä ei ole. Kuten kuvasta havaitaan, jännitykset pysyvät paarteen ulkopinnassa kaikkialla alle 550 megapascalissa.



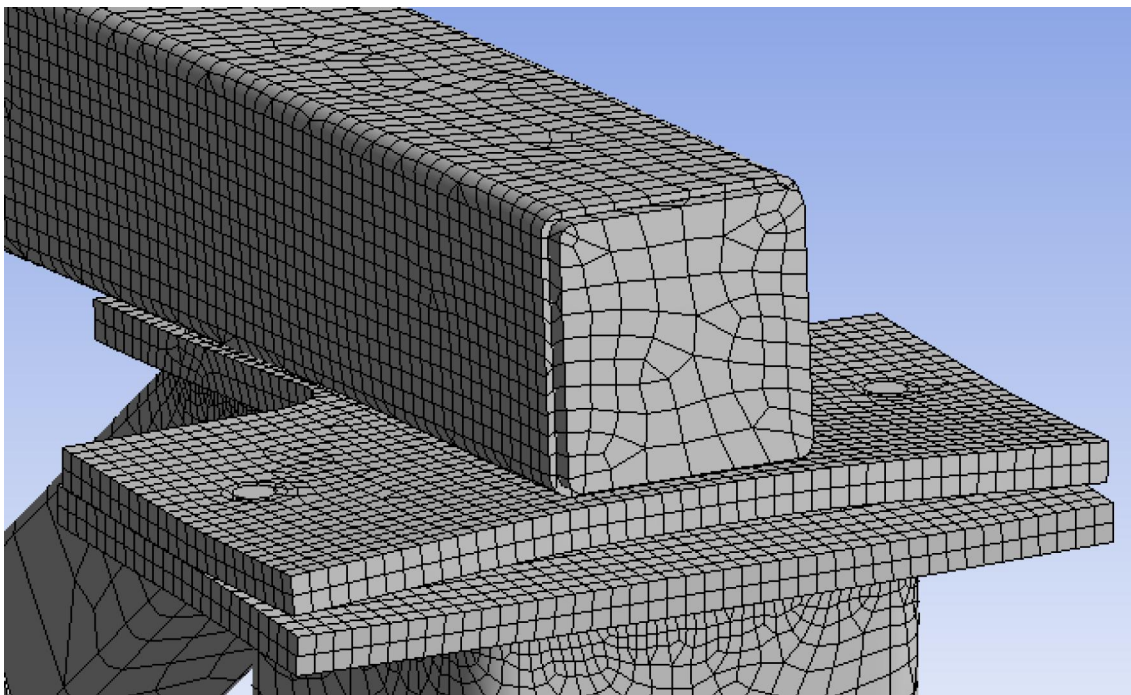
Kuva 25 Liitoksen von Mises -jännitys jakauma, leikkaus

Kuvasta 25 huomataan, että paarteen sisäpinnassa jännitys on yli 550 MPa, mutta se ei nouse yhtä korkealle koko materiaalin paksuuden läpi. Kuvien 24 - 26 perusteella havaitaan, että tässä liitoksessa jännitykset pysyvät hyvin alhaalla Ylemmässä liitoslevyssä näkyy pinnassa vaaleamman vihreitä laikkuja, jotka ilmaisevat jännityksen nousevan hieman yli 355 MPa:n, mutta enintään 380 MPa:iin. Ainoastaan paarteen sisäpinnassa jännitys nousee korkealle. Pinnan korkeamman jännityksen muodostumisilmiö on selitetty luvussa 4.2.



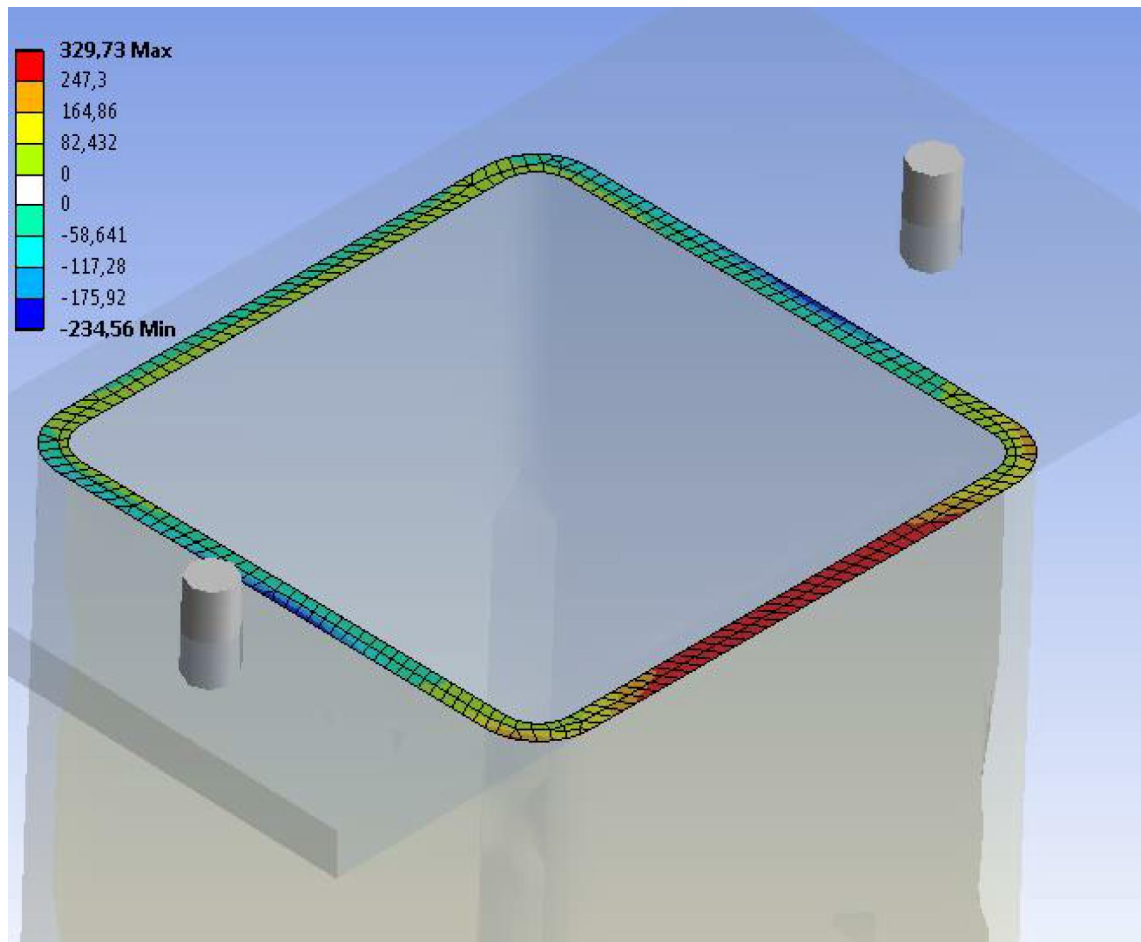
Kuva 26 Liitoksen von Mises -jännitysjaakauma paarteen ja diagonaalin sauman kohdalla

Kuten kuvasta 26 huomataan, diagonaalin jännitys pysyy joka puolella alle 420 MPa, mikä on diagonaalin myötöraja. Paarteen ja vahvistuslevyn sauman kohdalla jännitys menee muutamassa pienessä kohtaa yli 550 MPa, mutta ainoastaan paarteen pinnassa, mikä tutkimusten perusteella vaikuttaisi käyvän jokaisen liitoksen kohdalla.



Kuva 27 Liitoslevyn taipuma

Kuvassa 27 esitetään liitoslevyn taipuma. Taipuma on skaalattu viisinkertaiseksi todelliseen taipumaan nähden, jotta levyjen käyttäytymisestä saa selvän kuvan. Tässä tilanteessa vertaamalla kuvia 22 ja 27 keskenään huomataan, että silloin kun paarteen ja diagonaalin välinen liitos on vahvistettu kuvan 27 mukaisella tavalla, ylempi liitoslevy taipuu enemmän ja näin ollen rasittaa ruuveja sekä itse levyä enemmän. Liitoksessa oleviin ruuveihin muodostuu tässä tapauksessa yhteensä 356000 N vetovoimaa. Arvo on laskettu summaamalla yhteen ruuvien vetovoimat, jotka Ansys-ohjelma on antanut ruuveille. Luvussa 7 on esitelty uusien kehämallien avulla saatuja ruuvien vetovoimia ja niitä on verrattu FEM-analyysillä saatuihin ruuvivoimiin.

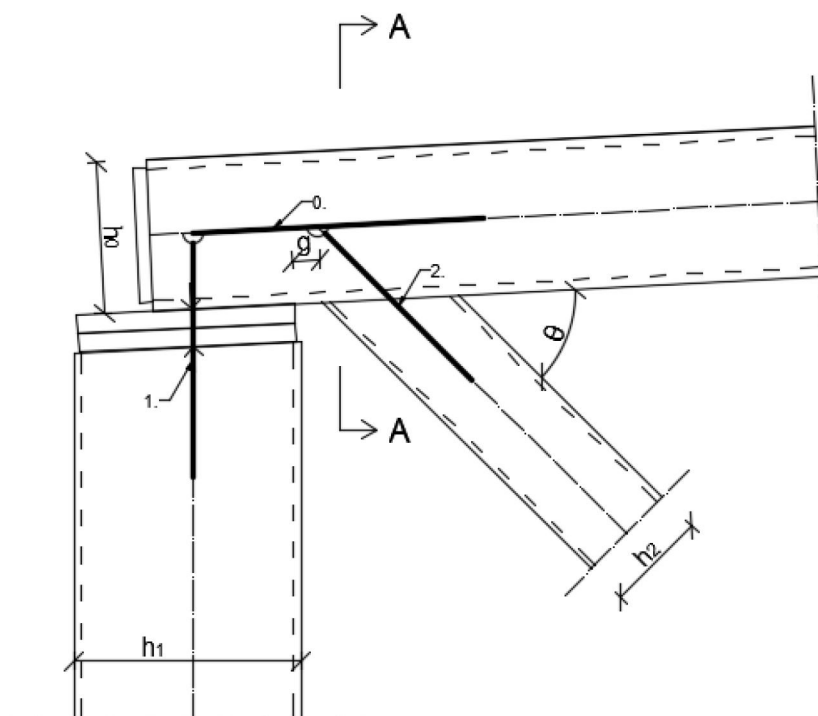


Kuva 28 *Pilarin päädyn von Mises -jännitys jakauma*

Kuvasta 28 nähdään, kuinka ristikolta pilarille tuleva jännitys jakautuu pilarin yläpäässä. Kuvan jännitys jakauman perusteella puristusvoima siirtyy pilarille tässäkin tapauksessa samankaltaisesti kuin edellisen kohdan tilanteessa, eli jännitys jakautuu pilarille pilarin sisäreunaa pitkin noin paarteen leveyden matkalla.

5. UUSI MITOITUSMENETELMÄ JA LASKENTAMALLI

Tavanomainen kehämalli, jota käytetään tässä työssä tutkittavan ristikon ja pilarin välisen liitoksen mitoittamiseen sauvamallia käytettäessä, on kuvan 29 mukainen. Kuvassa näkyvät tummennetut ja numeroidut osat 1, 2 ja 3 esittävät kehämallin sauvojen sijoittumista rakenneosiin. Kehämallissa pilarin ja diagonaalin keskilinjat kohtaavat paarteen keskilinjat ja näissä kohdissa on nivelet.

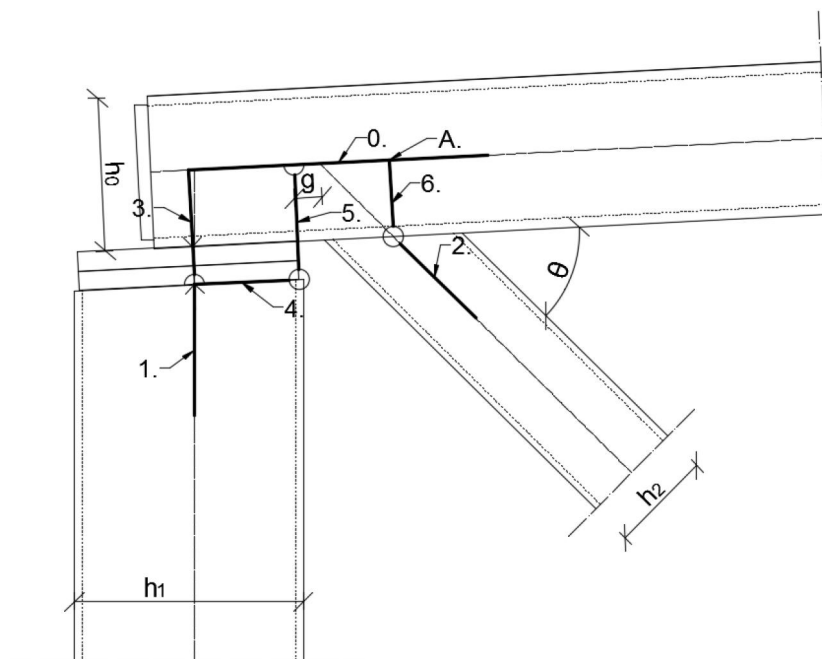


Kuva 29 Alkuperäisen kehämallin muodostaminen

Kuvan 29 mukaisesta kehämallista ei saada kaikkia rasitustietoja, joilla liitoskokonaisuus voitaisiin kokonaan mitoittaa. Kuten FEM-mallista nähtiin, ruuveille muodostuu vetorasitusta ristikon taipumasta johtuen. Kun ristikko kuormitetaan, ristikko taipuu ja tällöin puristusrasitus kulkeutuu pääosin pilarin sisäreunan kautta paarteelle. Tällöin ruuveille ja liitoslevyille muodostuu vetorasitusta. Tietoa vetorasituksen suuruudesta ei saada tästä kehämallista. Samaisesta epäkeskisestä puristuksesta pilarille muodostuu taivutusmomenttia, josta ei tällä kehämallilla saada tietoa johtuen paarteen ja pilarin välisestä nivelliitoksesta.

Paarteelle muodostuva taivutusmomentti on tällä kehämallilla laskettuna huomattavan suuri, koska mallin mukaan diagonaalin ja paarteen keskilinjoiden sekä pilarin ja paarteen keskilinjoiden leikkauskohtien välillä ei ole tukea. Todellisuudessa taivutusmomentin aiheuttama epäkeskisyys ei ole niin suuri, koska paarre tukeutuu pilarille sen sisäreunalla. Paarteelle muodostuu myös paikallista puristusrasitusta, koska pilarin tukivoima kohdistuu pääasiassa pilarin sisäreunan kautta paarteelle. Tätä puristusrasituksen suuruutta ei saada tällä kehämallilla selville.

Näistä edellä mainituista puutteista johtuen kehitetään kaksi uutta kehämallia, joilla pyritään havainnoimaan kyseisiä puutteita. Uusien kehämallien sauvojen sijoittelu on esitetty kuvissa 30 ja 31. Kuvien perässä on selvitys, kuinka malli muodostuu.

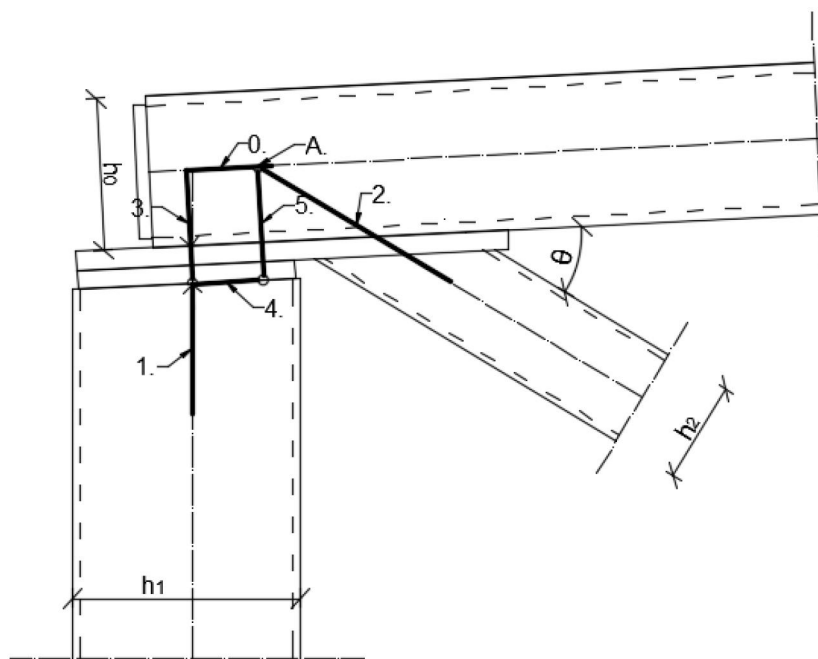


Kuva 30 Kehämallin 2 muodostaminen

Kuvassa 30 näkyvät sauvat 3, 5 ja 6 ovat kohtisuorassa sauvaan 0 nähden ja sauva 4 on kohtisuorassa sauvoja 3, 5 ja 6 vastaan. Sauva 0 on paarteen keskilinjaa suuntainen, sauva 1 pilarin keskilinjaa suuntainen ja sauva 2 diagonaalin keskilinjaa suuntainen. Sauvojen 1 ja 4, sauvojen 0 ja 3 sekä sauvojen 0 ja 6 välillä on jäykät liitokset ja sauvojen 3 ja 4, sauvojen 4 ja 5, sauvojen 0 ja 5 sekä sauvojen 2 ja 6 välillä on nivelet.

Sauvat 4, 5 ja 6 kuvaavat kyseisen rakenneosan keskilinjaa ja ulkopinnan välistä epäkeskisyyttä. Sauvojen taivutusjäykkyys ja aksiaalinen jäykkyys ovat äärettömän suuria. Näiden sauvojen jäykkyyden tarkempi määrittäminen vaatisi tarkemman analyysin ja laajemmat tutkimukset, joita tässä tutkimuksessa ei ollut mahdollista toteuttaa. Tästä johtuen rakenne yksinkertaistettiin käyttämällä täysin jäykkiä sauvoja, joiden avulla haettiin mahdollisimman tarkat tulokset.

Sauvat 0, 1 ja 2 kuvaavat rakenneosia ja niiden jäykkyydet vastaavat kyseisten rakenneosien jäykkyyksiä. Sauvalla 3 kuvataan ruuvien ja ylemmän liitoslevyn yhteistä pystysuuntaista jäykkyyttä ja sen määrittäminen selitetään myöhemmin. Sauvassa 3 vaikuttavalle vetorasitukselle mitoitetaan ruuvit sekä liitoslevy. Sauvan 5 sijainti alapäästään on pilarin seinämävahvuuden keskellä ja sillä kuvataan pilarilta paarteelle tulevaa tukireaktiota, jolle paarteen paikallinen puristuskestävyys voidaan mitoittaa.



Kuva 31 Kehämallin 3 muodostaminen

Kuvan 31 mukaisessa kehämallissa 3 sauvojen väliset liitokset sekä sauvojen merkitykset ovat samat kuin kuvan 30 mukaisessa kehämallissa 2. Koska joskus diagonaalin ollessa loivemmassa kulmassa paarteeseen nähden diagonaalin keskilinja kohtaa paarteen keskilinjaa kuvan 30 mukaisten sauvojen 3 ja 5 välissä, estimoidaan sellaista tilannetta siirtämällä sauva 5 alkamaan yläpäästään paarteen ja diagonaalin keskilinjojen leikkauskohdasta. Tällaisessa tapauksessa diagonaalin sauva jatketaan suorana paarteen keskilinjaan saakka. Kuten myöhemmin huomataan, tällä mallilla saadaan paras estimaatti tähän tilanteeseen. Kuvan 31 mukainen tilanne tapahtuu useammin silloin, kun yläpaarteen ja diagonaalin välinen liitos on vahvistettu, koska silloin diagonaalin keskilinja menee lähemmäksi paarteen päätä. Vastaava tilanne voi silti myöskin toteutua tilanteessa, jossa liitosta ei ole vahvistettu. Tällaisessa tilanteessa käytetään myös kuvan 31 mukaisesta kehämallista 3.

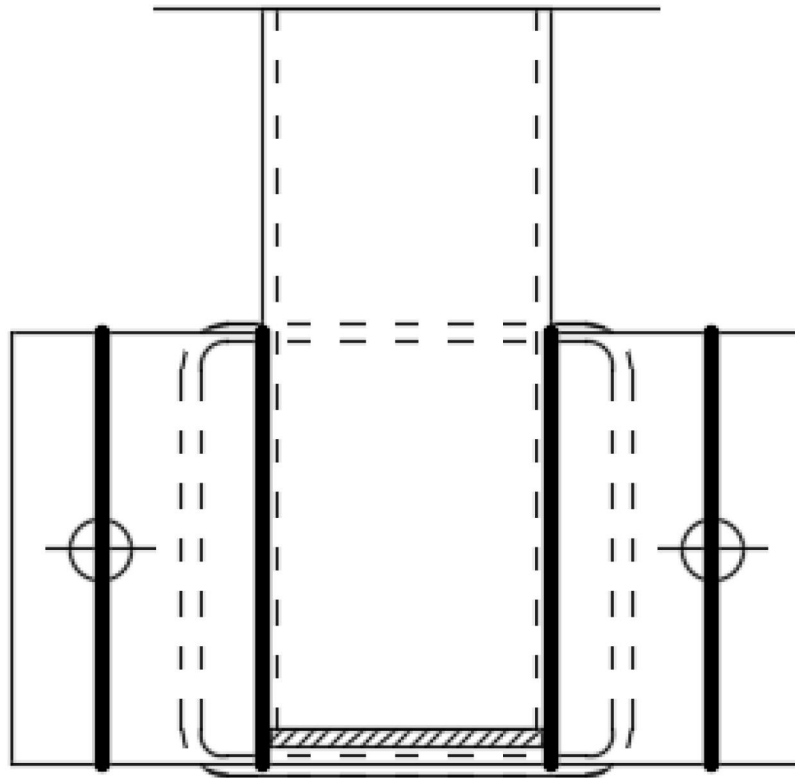
Tässä työssä yksinkertaistetaan liitoslevyn ja ruuvien jännityksen laskentaa olettamalla, että vain ylempi liitoslevy taipuu ja alempi pysyy suorana. Oletus tehdään sillä perusteella, että pilarin ollessa leveämpi kuin paarte, on ruuvien etäisyys paarteen kylkiin suurempi kuin ruuvien etäisyys pilarin kylkiin, jolloin ylemmällä päätylevyllä on levyn

taipuva väli huomattavasti suurempi. Luvun 4 tuloksista nähdään, että tämä olettaus on hyvin lähellä todellista tilannetta. Tehdyn olettamuksen perusteella ruuvien ja liitoslevyn yhteistä jäykkyyttä määritettäessä lasketaan jäykkyystekijät ylemmälle liitoslevylle ja ruuveille. Näiden yhteinen jäykkyys asetetaan vastaamaan kuvien 30 ja 31 mukaisia sauvoja 3 muuttamalla kyseisen sauvan poikkileikkauspinta-alaa sekä pituutta alla esitettävien laskentojen avulla.

SFS-EN 1993-1-8 taulukko 6.11 esittää liitoksen peruskomponenttien jäykkyystekijöiden laskennat [1]. Päätylevyn taivutuksen jäykkyystekijä lasketaan kaavalla

$$k_5 = \frac{0,9l_{eff}t_p^3}{m^3} \quad (5.1)$$

jossa l_{eff} on ruuvirivin pienin tehollinen pituus. Tehollisen pituuden tarkka määrittäminen edellyttäisi laajoja tutkimuksia, joita tässä tutkimuksessa ei ole mahdollista tehdä, joten tehollisen pituuden on arvioitu olevan ylemmän liitoslevyn pituus kuvan 32 mukaisesti. Tällä olettamuksella liitoslevy myötää saman kuvan osoittamien tummien myötöviivojen kohdalta. t_p on liitoslevyn paksuus ja m on ruuvireiän keskikohdan etäisyys paarteeseen kyljestä.



Kuva 32 Pituuden l_{eff} määrytyminen. Yksi tumma viiva vastaa pituutta l_{eff}

Ruuvien vedon jäykkyystekijä lasketaan kaavalla

$$k_{10} = \frac{1,6A_s}{L_b} \quad (5.2)$$

Kaava (5.2) on annettu tilanteelle, jossa paarteen molemmin puolin olevat ruuvit muodostavat yhden ruuvirivin, jossa on kaksi ruuvia. Tässä työssä niitä on vain yksi, joten kaava muuttuu muotoon

$$k_{10} = \frac{1,6A_s}{2L_b} \quad (5.3)$$

Kaavassa A_s on ruuvien leikkauspinta-ala ja L_b on ruuvien venymäpituus. Venymäpituus määritetään laskemalla yhteen liitoslevyjen paksuus, aluslaattojen paksuus sekä puolet ruuvien kannan paksuudesta ja puolen mutterin paksuudesta.

Ruuvien ja levyn yhteinen jousivakio määritetään kaavalla

$$k = \frac{1}{1/Ek_5 + 1/Ek_{10}} \quad (5.4)$$

Koska kertoimet k_5 ja k_{10} eivät ole jousivakioita, kerrotaan ne teräksen kimmomodulilla E . Rakenneseosan aksiaalisen jäykkyyden, jousivakion ja pituuden välillä on yhteys

$$EA = kL \quad (5.5)$$

jossa A on elementin poikkileikkausala ja L on elementin pituus. Kaavasta (5.5) voidaan ratkaista A , jolloin elementin poikkileikkausala tulee

$$A = \frac{kL}{E} \quad (5.6)$$

Elementin pituus L määritetään laskemalla yhteen puolet paarteen korkeudesta sekä liitoslevyjen yhteenlaskettu paksuus. Koska tarkoituksena on määrittää kuvien 30 ja 31 mukainen elementti 3 vastaamaan ruuvien ja ylemmän liitoslevyn yhteistä käyttäytymistä, määritetään sen elementin poikkileikkausala sijoittamalla kaavaan (3.16) kaavan (5.4) mukainen jousivakio, elementin pituus sekä teräksen kimmomoduli.

Kun nyt tunnetaan elementin 3 poikkileikkausala sekä pituus, voidaan rakentaa kehämalli kehäohjelmaan (tässä työssä käytetty ohjelma on SCIA Engineer 16.1 [4]) ja siitä saadaan tarvittavat rasitukset liitoksen mitoituksen loppuun saattamiseen. Luvussa 6 on laskettu kaksi esimerkkiä, joissa on käytetty kuvien 30 ja 31 mukaisia kehämalleja. Liitteessä 5 on esitetty elementin 3 eli venymäelementin poikkileikkausalan laskeminen useammalle eri mallille, FEM-analyysin antamat tulokset ruuvien vetovoimille sekä uuden kehämallin antamat vetovoimat.

6. LASKELMAT

Tässä luvussa esitetään mitoitus luvussa 5 esiteltyjen uusien kehämallien avulla. Mitoituksen alkuosa yläpaarteen taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutukseen saakka kulkee samalla tavalla kuin luvussa 3 esitellyissä laskelmissa. Rasiitukset muodostuvat kehämallin 2 perusteella erisuuruiksi kuin luvussa 3.

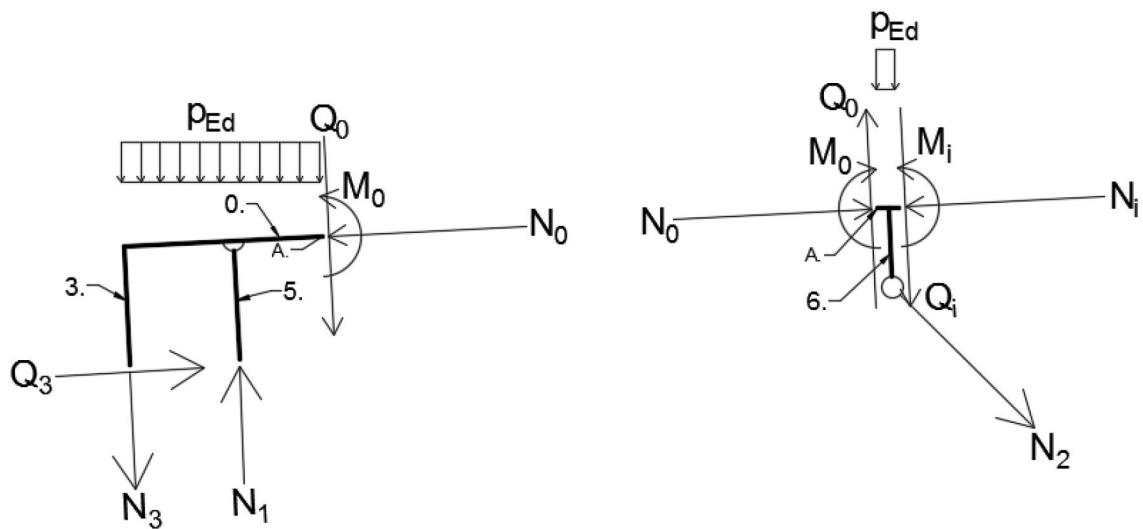
Tässä luvussa ei esitellä laskelmien alkuosuuksia, mutta laskut ovat nähtävissä kokonaisuudessaan liitteessä 3 (vahvistamaton yläpaarteen ja diagonaalin välinen liitos) sekä liitteessä 4 (vahvistettu yläpaarteen ja diagonaalin välinen liitos). Lukujen 6.1 ja 6.2 alussa esitellään vapaakappalekuvat sekä liitoksen rasiitukset.

6.1 Vahvistamaton yläpaarteen ja diagonaalin välinen liitos

Tässä luvussa mitoitetaan kuvan 7 mukainen liitos, jossa yläpaarteen ja diagonaalin välistä liitosta ei ole vahvistettu levyllä. Rasiitukset liitokselle tulevat luvussa 5 esitellyn uuden kehämallien perusteella ja ne on määritetty SCIA Engineer 16.1 -ohjelmalla [4].

6.1.1 Lähtötiedot ja rasiitukset

Taulukko 1 sisältää liitoksen parametrit. Kuvassa 33 on esitettyä kyseisen liitoksen vapaakappalekuva ja Taulukko 7 sisältää liitokseen muodostuvat rasiitukset luvun 3.1.1 mukaisilla kuormituksilla.



Kuva 33 Mitoitettavan liitoksen vapaakappalekuva

Taulukko 7 Ristikön rasi-
tukset

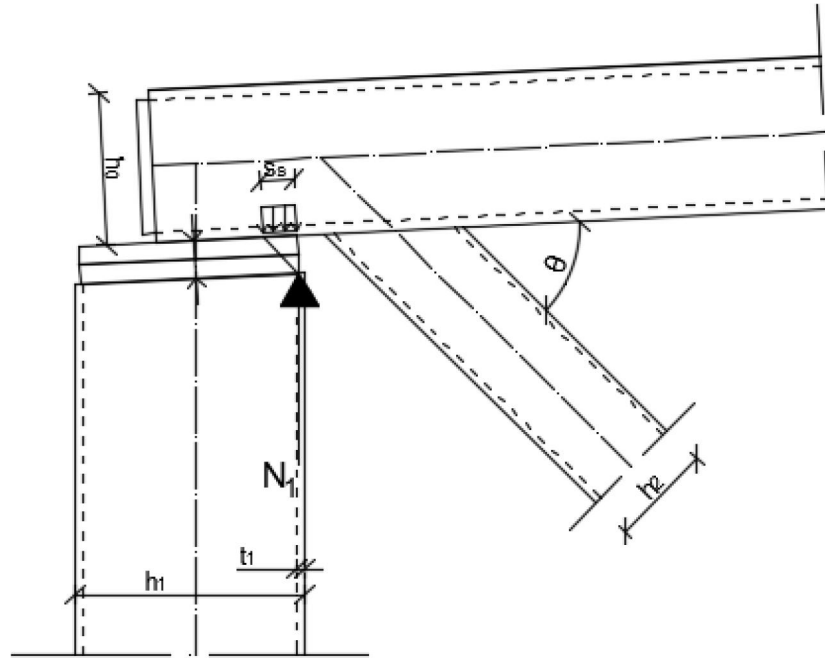
N_0 [N]	Paarteen normaalivoima	21200
N_1 [N]	Pilarin normaalivoima	773100
N_2 [N]	Diagonaalin normaalivoima	499500
N_3 [N]	Ruuvien normaalivoima	220100
Q_0 [N]	Paarteen leikkausvoima	547600
Q_3 [N]	Ruuvien leikkausvoima	21200
M_0 [kNm]	Paarteen taivutusmomentti	46,90

Kuvan 33 vapaakappalekuvan mukaan ruuveille kohdistuu vetorasitusta, pilarille puristusrasitusta, paarteelle puristusrasitusta sekä diagonaalille vetorasitusta. Kaikki rasitukset on otettu pisteessä A, diagonaalin ja yläpaarteen liitoksen vasemmalta puolelta. Oikealla puolella olevat rasitukset huomioidaan ristikon mitoituksessa.

Yläpaarteen ja diagonaalin liitos sekä yläpaarteen kestävyys tuella lukuun ottamatta paarteen paikallista kestävyyttä tapahtuu lukujen 3.1.2 ja 3.1.3 mukaan. Ainoastaan rasitukset muuttuvat. Taulukko 7 sisältää kyseiset rasitukset. Tarkat laskelmat on esitetty liitteessä 3.

6.1.2 Yläpaarteen pistekuormakestävyys tuella

Yläpaarteen pään kestävyys määritetään pilarin tukireaktion aiheuttamalle pistekuormalle. Yksinkertaistetaan laskentaa olettamalla pistekuorma siirtyvän ainoastaan pilarin sisäreunan kautta kuvan 34 mukaisesti. Tällöin tulos on varmalla puolella. Kuorman voidaan olettaa siirtyvän liitoslevyjen läpi 45° kulmassa kuvan mukaisesti. Tällöin kuorman vaikutuspituus s_s on yhtä suuri kuin liitoslevyjen yhteispaksuus. Liitoslevyt ovat kumpikin paksuudeltaan 20 mm, joten kuorman vaikutuspituus on 40 mm. Liitteestä 3 huomataan ettei pistekuormakestävyys ole riittävän suuri, joten uumat joudutaan vahvistamaan. FEM-analyysissä havaittiin, että paarteen kylkien pinnassa jännitys nousi yli myötörajan, mutta analyysin perusteella vahvistamistarvetta ei ollut, joten tämä kehämalli antaa selvästi varmalla puolella olevan tuloksen. Tässä osassa uumien leveyteen on lisätty vahvistuslevyjen paksuus t_v . Pistekuorman mitoitusarvona käytetään kuvan 33 esittämää pilarin puristusrasitusta N_1 , joka kohdistuu kutakuinkin kuvassa 34 esitettyyn kohtaan. Kuvassa on esitetty myös pistekuorman jakautuminen paarteelle.



Kuva 34 Pilarin tukireaktion aiheuttaman pistekuorma jakautuminen

Pistekuorman voidaan ajatella vaikuttavan kaukana palkin päästä olevana kuormana, koska palkin pääty on vahvistettu levyllä. Pistekuormakestävyyden laskentakaava [2] on

$$F_{WRd} = C_F \times \frac{(t_0 + t_v)^2 f_{y0}}{\gamma_{M1}} \quad (6.1)$$

missä tekijän C_F laskentakaava riippuu kuormituksen sijainnista sekä suhteesta $s_s/t_0 + t_v$. Edellä mainitun suhteen arvo on 3,08 ja se on alle 60, sekä pistekuorma on kaukana palkin päästä, joten tekijä C_F lasketaan kaavalla [2]

$$C_F = k_3 k_4 k_5 \times \left(14,7 - \frac{h_0 - t_0}{49,5} \right) \times \left(1 + 0,007 \times \frac{s_s}{t_0 + t_v} \right) \quad (6.2)$$

Tekijä $k_3 = 1$ ja tekijöiden k_4 sekä k_5 laskemiseen tarvitaan aputermejä k ja r_i (putken nurkan sisäsäde). Näiden termien laskentakaavat ovat:

$$r_i = r_0 - t_0 \quad (6.3)$$

$$k = \frac{f_{y0}}{228} \quad (6.4)$$

Sijoittamalla lukuarvot kaavoihin (6.3) ja (6.4), putken sisäsäteeksi saadaan 12 mm ja tekijän k arvoksi 2,41. Tekijät k_4 ja k_5 lasketaan kaavoilla

$$k_4 = 1,22 - 0,22 \times k \quad (6.5)$$

$$k_5 = 1,06 - 0,06 \times \frac{r_i}{t_0} \leq 1,0 \quad (6.6)$$

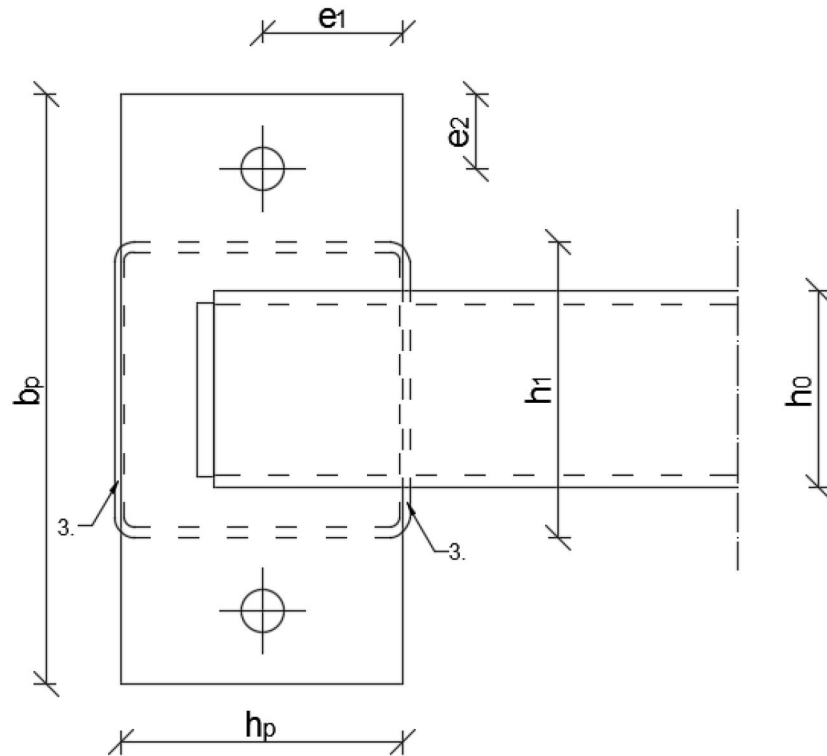
Sijoittamalla lukuarvot kaavoihin (6.5) ja (6.6), saadaan termiksi k_4 0,69 ja termiksi k_5 0,97.

Sijoittamalla lasketut lukuarvot ja tunnetut arvot kaavaan (6.2), termin C_F arvoksi saadaan 9,88. Kaavalla (6.1) saadaan kestävyysden F_{WRd} arvoksi 918,26 kN, joka on suurempi kuin kuorman N_1 puolikas (rasitus N_1 jakautuu kahdelle uumalle), joten paarteen pää kestää pistevoiman aiheuttaman rasituksen.

6.1.3 Ruuviliitoksen kestävyys

Tässä luvussa käsitellään ruuviliitoksen kestävyysden mitoitus, mikä sisältää ruuvien leikkaus- ja vetokestävyysmitoituksen sekä levyn reunapuristuskestävyyden ja ruuvien lävistymiskestävyys laskennan.

Ruuveille kohdistuu leikkausrasitus Q_3 kuvan 33 vapaakappalekuvan mukaisesti. Kuten kuvasta 35 nähdään, liitoksessa on 2 ruuvia. Tällöin leikkausrasitus yhtä ruuvia kohden on puolet voimasta Q_3 . Taulukko 8 sisältää ruuvien ja levyjen parametrit.



Kuva 35 Pilari-palkki-liitos ylhäältä päin kuvattuna

Taulukko 8 Ruuvien ja levyjen parametrit

Suure	Selite	Suuruus
d [mm]	Ruuvin halkaisija	30
d_0 [mm]	Ruuvireiän halkaisija	33
A [mm ²]	Ruuvin poikkileikkauspinta-ala	707
t_p [mm]	Liitoslevyn paksuus	20
h [mm]	Liitoslevyn pituus	240
$e_{1\min}$ [mm]	Reunaetäisyyden 1 minimiarvo ($1,2 \times d_0$)	39,6
$e_{2\min}$ [mm]	Reunaetäisyyden 2 minimiarvo ($1,2 \times d_0$)	39,6
e_1 [mm]	Reunaetäisyys 1	85
e_2 [mm]	Reunaetäisyys 2	50
f_{yb} [MPa]	Ruuvin myötöraja	640
f_{ub} [MPa]	Ruuvin murtolujuus	800
f_u [MPa]	Levyn murtolujuus	355

Ruuvien leikkauskestävyys lasketaan kaavalla

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (6.7)$$

missä ruuvien lujuusluokasta riippuva kerroin $\alpha_v = 0,6$ ja ruuvien kestävyys osavarmuusluku $\gamma_{M2} = 1,25$. Jännityspoikkipinta-ala A_s voidaan laskea kaavalla $A_s \approx 0,78 \times$

A , mutta esimerkiksi Teräsrakenneyhdistyksen eurocode 3 – oppikirjasta löytyy eri poikkileikkauspinta-aloja taulukoituna [10].

Taulukko 9 Ruuvien poikkileikkausalat ja leikkauskestävyys $F_{v,Rd}$ (kN) 8.8 ruuveille [10]

Ruuvi	Jännityspinta-ala A_s (mm ²)	Leikkauskestävyys (kN) leikettä kohti, kun kierteet ovat leikkaustasossa	Poikkileikkausala varren kierteettömällä alueella (mm ²)	Leikkauskestävyys (kN) leikettä kohti, kun kierteet eivät ole leikkaustasossa
M12	84,3	32,4	113	43,4
M16	157	80,3	201	77,2
M20	245	94,1	314	120,6
M24	353	135,6	452	173,7
M30	561	215,4	707	271,4

Taulukko 9 sisältää ruuvien poikkileikkausalat sekä ruuvien leikkauskestävyydet, mutta tässä esimerkissä on esitetty laskenta ruuvien leikkauskestävyydelle. Sijoittamalla luku-arvot kaavaan (6.7) saadaan leikkauskestävyydeksi 215,42 kN. Leikkauskestävyys on suurempi kuin yhdelle ruuville kohdistuva leikkausrasitus, joten ruuvien leikkauskestävyys riittää.

Levyn reunapuristuskestävyys lasketaan kaavalla

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 a_b f_u d t_p}{\gamma_{M2}} \quad (6.8)$$

missä d on ruuvien halkaisija, t_p liitoslevyn paksuus ja voiman suunnasta riippuvat tekijät lasketaan kaavoilla

$$a_b = \min\left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}, ; 1,0\right) \quad (6.9)$$

$$k_1 = \min\left(2,8 \times \frac{e_2}{d_0}; 2,5\right) \quad (6.10)$$

Sijoittamalla arvot kaavoihin (6.9) ja (6.10), saadaan lukuarvoiksi $a_b = 0,86$ ja $k_1 = 2,5$. Kaavan (6.8) perusteella saadaan reunapuristuskestävyyden mitoitusarvoksi 515,15 kN, mikä on leikkausvoimaa suurempi, joten reunapuristuskestävyys on riittävä.

Ruuveille kohdistuva vetorasitus on kuvan 33 mukainen N_3 ja sen suuruus on 220,10 kN. Kuvassa oleva voima N_3 kohdistuu kummallekin ruuville, joten yhtä ruuvia kohden oleva vetorasitus on puolet voiman suuruudesta eli 110,05 kN. Ruuvien vetokestävyys lasketaan kaavalla

$$F_{t.Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (6.11)$$

jossa pienennyskerroin k_2 riippuu ruuvin kannan muodosta ja tässä tapauksessa sen suuruus on 0,9, koska ruuvi ei ole uppokantainen [1]. Sijoittamalla lukuarvot kaavaan (6.11) saadaan ruuvin vetokestävyyden mitoitusarvoksi 323,14 kN, mikä on suurempi kuin vetorasitus ja näin ollen ruuvien vetokestävyys on riittävä.

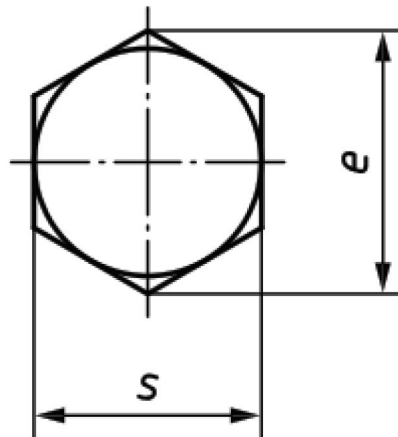
Ruuvien ja mutterin lävistymiskestävyyteen vaikuttava rasitus on sama kuin ruuville kohdistuva vetorasitus. Ruuvien lävistymiskestävyys lasketaan kaavalla

$$B_{p.Rd} = \frac{0,6\pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.12)$$

missä ruuvien kannan etäisimpien pisteiden ja avainvälin keskiarvo lasketaan kaavalla

$$d_m = \frac{s + e}{2} \quad (6.13)$$

Kuva 36 havainnollistaa mittojen s ja e sijoittumisen ruuvin kantaan.



Kuva 36 Ruuvien kannan mittatiedot [11]

Ruuville, joka on kokoa M30, avainmitta $s = 46 \text{ mm}$ ja mitta $e = 50,85 \text{ mm}$ [11]. Sijoittamalla lukuarvot kaavaan (6.13), mitaksi d_m saadaan 48,42 mm. Kaavaa (6.12) käyttämällä saadaan lävistymiskestävyyden mitoitusarvoksi 730,23 kN. Koska vetorasitus yhtä ruuvia kohden on 110,05 kN, reunapuristuskestävyys on riittävä.

Ruuvien yhdistetty leikkaus- ja vetovoimakestävyys lasketaan kaavalla

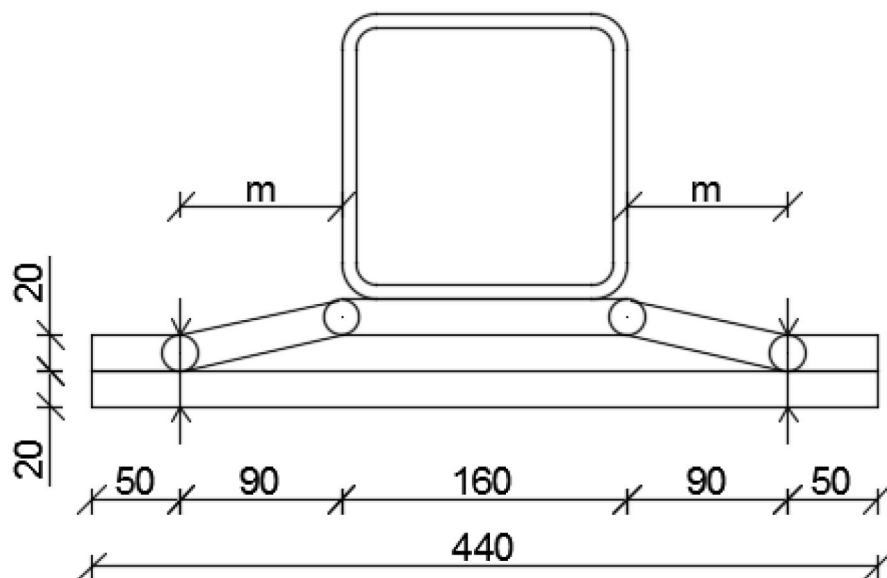
$$p = \frac{0,5Q_{3.Ed}}{F_{v.Rd}} + \frac{0,5N_{3.Ed}}{1,4F_{t.Rd}} \leq 1,0 \quad (6.14)$$

missä $N_{3,Ed}$ on ruuville kohdistuva vetovoima. Sijoittamalla arvot kaavaan (6.14), saadaan tulokseksi 0,29, joten ruuvit kestävät myös leikkaus- ja vetorasituksen yhteisvaikutuksen.

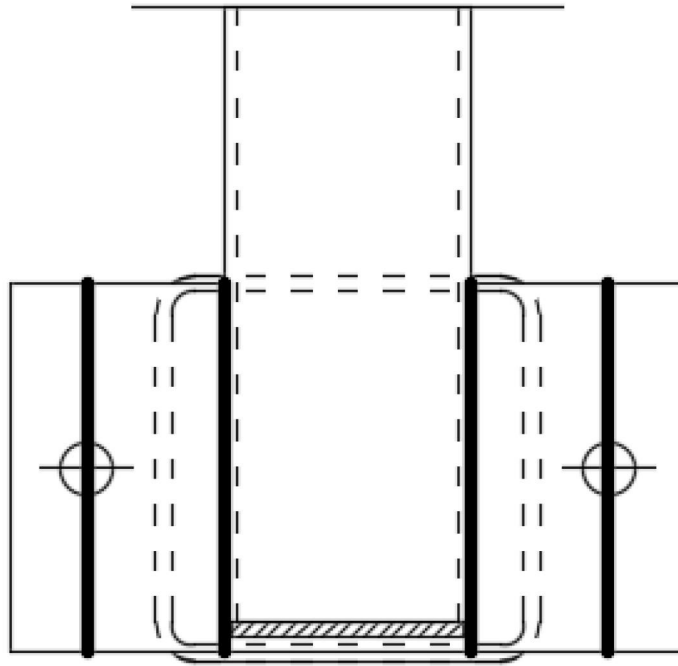
Koska ruuvin leikkauskestävyys 215,42 kN ja reunapuristuskestävyys 515,15 kN ovat suurempia kuin yhden ruuvin leikkausvoima 10,6 kN, ruuvin vetokestävyys 323,14 kN ja ruuvin lävistymiskestävyys 730,23 kN ovat suurempia kuin yhden ruuvin vetorasitus 110,5 kN sekä ruuvin yhdistetyn leikkaus- ja vetokestävyiden käyttöaste on 0,29, ruuvi-liitos on riittävän kestävä.

6.1.4 Liitoslevyn taivutuskestävyys

Standardi EN 1993-1-8 esittää taulukossa 6.2 laipan T-osan kestävyysmitoitussarvon laskennan [1]. Tällaisessa tapauksessa uumaan kohdistuu vetorasitus ja laipan läpi olevat kaksi ruuvia pitävät laipan T-osaa paikallaan, jolloin T-osaan kohdistuu taivutusta. Tässä laskennassa estimoidaan pilarin ja paarteen välisen ylemmän liitoslevyn taivutusrasitusta vastaavana tapauksena, jossa laipan T-osa on paarteeseen kiinnitetty liitoslevy ja uumana toimii paarre.



Kuva 37 Yläpaarteen ja pilarin välinen liitos takaa kuvattuna, murtumismalli 1



Kuva 38 Ylemmän liitoslevyn oletetut myötöviivat

Kuvissa 37 ja 38 on esitetty liitoksen kuvat päädyistä sekä ylhäältä päin. Kuvassa 37 näkyy, kuinka ylemmän liitoslevyn oletetaan taipuvan ja alemman pysyvän suorana. Tämä oletus tulee siitä, että alempaan liitoslevyyn liittyvä pilari on huomattavasti leveämpi kuin paarre, jolloin paarteiden liitoslevyn taipuva väli paarteiden kyljestä ruuviin on huomattavasti suurempi. Koska liitoslevyt ovat paksuudeltaan samoja, oletetaan ylemmän liitoslevyn taipuvan huomattavasti herkemmin kuin alemman. Tätä oletusta tukevat myös kohdassa 4 esitellyt kolmiulotteiset FEM-mallit.

Kuvassa 38 esitellään ylemmän liitoslevyn oletetut myötöviivat tummilla viivoilla. Todellisuudessa liitoslevy ei taivu tarkalleen kyseisiä myötöviivojen pitkin, mutta tässä työssä oletetaan myötöviivojen olevan kuvan kaltaiset. Nyt levyn taivutuskestävyydessä efektiivisen pituuden l_{eff} voidaan olettaa olevan yhtä suuri kuin liitoslevyn pituus h_p .

Tässä osassa tutkitaan levyn kestävyys kolmen eri murtumismallin perusteella, jotka ovat täyden mekanismin syntyminen laipassa, ruuvien murtuminen kun laippa samalla myötää sekä ruuvien murtuminen. Näistä kolmesta määräävin tapaus määrittää laipan kestävyuden. [1]

Murtumismallin 1 mukainen kestävyys lasketaan kaavalla

$$F_{T.1.Rd} = \frac{4M_{pl.1.Rd}}{m} \quad (6.15)$$

Missä m on kuvan 37 mukainen etäisyys paarteen kyljestä ruuvien keskelle ja plastinen taivutusmomentti lasketaan kaavalla

$$M_{pl.1.Rd} = \frac{l_{eff} t_p^2 f_u}{4\gamma_{M0}} \quad (6.16)$$

Kaavassa (6.16) esiintyvät arvot tunnetaan ja kun ne sijoitetaan kaavaan, saadaan plastisen taivutusmomentin arvoksi 6,04 kNm. Kun nyt tunnetut arvot sijoitetaan kaavaan (6.15), saadaan murtumismallin 1 mukaiseksi taivutuskestävyydeksi 268,22 kN. Koska liitosta rasittava kuormitus N_3 on 220,10 kN, liitos kestää kyseisen tapauksen.

Murtumismallin 2 mukainen kestävyys lasketaan kaavalla

$$F_{T.2.Rd} = \frac{2M_{pl.2.Rd} + n \sum F_{t.Rd}}{m + n} \quad (6.17)$$

Tässä tapauksessa, kun kaikki myötöviivat ovat samanpituisia, $M_{pl.2.Rd} = M_{pl.1.Rd}$. $F_{t.Rd}$ on yhden ruuvien vetokestävyyden mitoitusarvo, minkä laskenta on esitetty kaavassa (6.11). $\sum F_{t.Rd}$ on liitoksessa esiintyvien kaikkien ruuvien vetokestävyyksien summa. Kaavassa esiintyvä n on mitta ruuvien keskeltä laipan ulkoreunaan, mikä on kuvan 37 mukaisesti 50 mm.

Sijoittamalla tunnetut arvot kaavaan (6.17) saadaan murtumismallin 2 mukaiseksi vetokestävyydeksi 317,03 kN. Kestävyys on murtumismallin 1 mukaista kestävyyttä suurempi, joten se ei muodostu tässä tapauksessa määrääväksi.

Murtumismallin 3 mukainen kestävyys lasketaan kaavalla

$$F_{T.3.Rd} = \sum F_{t.Rd} \quad (6.18)$$

Yhden ruuvien vetokestävyyden mitoitusarvoksi tulee 323,14 kN, joten kahden ruuvien vetokestävyys on 646,27 kN. Kestävyys on kahta edellistä suurempi, joten se ei muodostu tässä tapauksessa määrääväksi.

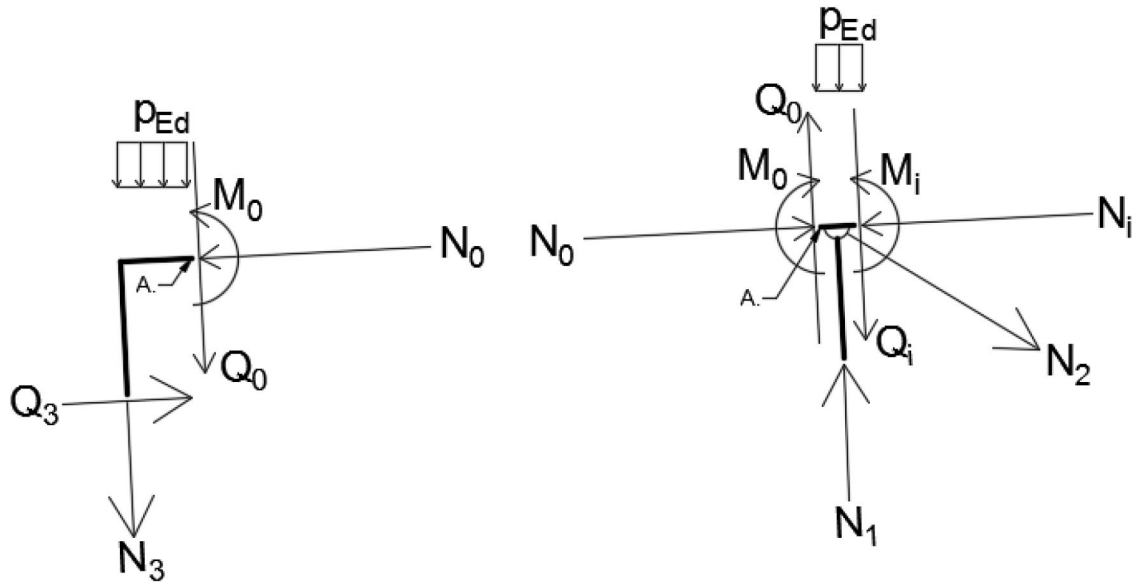
Koska määräävin murtumismallin 1 mukainen kestävyys on 268,22 kN on suurempi kuin rasitus 220,10 kN, liitoslevyn taivutuskestävyys on riittävä.

6.2 Vahvistettu yläpaarteen ja diagonaalin välinen liitos

Tässä kohdassa mitoitetaan kuvan 11 mukainen liitos, jossa yläpaarteen ja diagonaalin välinen liitos on vahvistettu levyllä. Rasitukset liitokselle tulevat kohdassa 5 esitellyn uuden kehämallin perusteella ja ne on määritetty SCIA Engineer 16.1 -ohjelmalla [4].

6.2.1 Lähtötiedot ja rasitukset

Taulukko 3 sisältää liitoksen parametrit. Kuvassa 39 on esitettyä kyseisen liitoksen vapaakappalekuva ja Taulukko 10 sisältää liitokseen muodostuvat rasitukset kohdan 3.2.1 mukaisilla kuormituksilla.



Kuva 39 Mitoitettavan liitoksen vapaakappalekuva

Taulukko 10 Ristikön rasitukset

N_0 [N]	Paarteen normaalivoima	9500
N_1 [N]	Pilarin normaalivoima	666700
N_2 [N]	Diagonaalin normaalivoima	605300
N_3 [N]	Ruuvien normaalivoima	300500
Q_0 [N]	Paarteen leikkausvoima	301900
Q_3 [N]	Ruuvien leikkausvoima	9500
M_0 [kNm]	Paarteen taivutusmomentti	15,50

Kuvan 39 vapaakappalekuvan mukaan ruuveille kohdistuu vetorasitusta, pilarille puristusrasitusta, paarteelle puristusrasitusta sekä diagonaalille vetorasitusta. Kaikki rasitukset on otettu pisteessä A, diagonaalin ja paarresauvan liitoksen vasemmalta puolelta. Oikealla puolella olevat rasitukset huomioidaan ristikon mitoituksessa.

Yläpaarteen ja diagonaalin liitos sekä yläpaarteen kestävyys tuella lukuun ottamatta paarteen paikallista kestävyyttä tapahtuu kohtien 3.2.2 ja 3.2.3 mukaan. Ainoastaan rasitukset muuttuvat. Taulukko 10 sisältää kyseiset rasitukset. Tarkat laskelmat on esitetty liitteessä 4.

6.2.2 Yläpaarteen pistekuormakestävyys tuella

Pistekuorman jakautumisen periaate paarteelle on esitelty kohdassa 6.1.2 sekä kuvassa 34. Koska tässäkin tapauksessa pistekuorman voidaan ajatella vaikuttavan kaukana palkin päästä, johtuen palkin päähän asennetusta päätylevyistä, määritetään pistekuormakestävyys kaavan (6.1) mukaan. Kaavassa esiintyvä termi C_F lasketaan suhteen $s_s/t_0 + t_v$ perusteella, joka tässäkin tapauksessa on alle 60 ($s_s/t_0 + t_v = 3,64$). Termi C_F lasketaan kaavalla (6.2). Kaavassa olevien tekijöiden k_4 ja k_5 määrittämiseen tarvittavat termit k sekä putken nurkan sisäsäde r_i lasketaan kaavoilla (6.3) ja (6.4). Putken nurkan sisäsäteeksi r_i saadaan 6 mm ja termiksi k saadaan 2,41.

Termin C_F laskennassa tarvittavat arvot k_4 ja k_5 lasketaan kaavoilla (6.5) ja (6.6). Arvoksi k_4 tulee 0,69 ja arvoksi k_5 tulee 1,0. Nyt voidaan sijoittaa lukuarvot kaavaan (6.2) ja kertoimeksi C_F saadaan 10,22. Kaavaa (6.1) käyttämällä yhden uuman pistekuormakestävyudeksi saadaan 679,92 kN, mikä on yhteen uumaan kohdistuvaa kuormaa suurempi, joten palkin pää kestää pistekuormarasituksen.

6.2.3 Ruuviliitoksen kestävyys

Tähän lukuun kuuluu ruuviliitoksen kestävyuden mitoitus, mikä sisältää ruuvien leikkaus- ja vetokestävyysmitoituksen sekä levyn reunapuristuskestävyyden ja ruuvien lävistymiskestävyuden laskennan.

Ruuveille kohdistuu leikkausrasitus Q_3 kuvan 39 vapaakappalekuvan mukaisesti. Kuten kuvasta 35 nähdään, liitoksessa on 2 ruuvia. Tällöin leikkausrasitus yhtä ruuvia kohden on puolet voimasta Q_3 . Taulukko 11 sisältää ruuvien ja levyjen parametrit.

Taulukko 11 Ruuvien ja levyjen parametrit

Suure	Selite	Suuruus
d [mm]	Ruuvien halkaisija	30
d_0 [mm]	Ruuvireiän halkaisija	33
A [mm ²]	Ruuvien poikkileikkauspinta-ala	707
t_p [mm]	Liitoslevyn paksuus	20
h [mm]	Liitoslevyn pituus	240
$e_{1\min}$ [mm]	Reunaetäisyyden 1 minimiarvo ($1,2 \times d_0$)	39,6
$e_{2\min}$ [mm]	Reunaetäisyyden 2 minimiarvo ($1,2 \times d_0$)	39,6
e_1 [mm]	Reunaetäisyys 1	85
e_2 [mm]	Reunaetäisyys 2	50
f_{yb} [MPa]	Ruuvien myötöraja	640
f_{ub} [MPa]	Ruuvien murtolujuus	800
f_u [MPa]	Levyn murtolujuus	550

Ruuvien leikkauskestävyys lasketaan kaavalla (6.7). Kaavassa esiintyvä lujuusluokasta riippuva kerroin $\alpha_v = 0,6$. Taulukko 9 sisältää tiedon ruuvien jännityspoikkipinta-alasta.

Ruuvien leikkauslujuudeksi $F_{v,Rd}$ saadaan 215,42 kN, joka on leikkausvoiman puolikasta 4,75 kN suurempi, joten ruuvien leikkauslujuus on riittävän suuri.

Levyn reunapuristuskestävyys lasketaan kaavalla (6.8). Kaavassa esiintyvät termit k_1 ja a_b lasketaan kaavoilla (6.9) ja (6.10), joista saadaan, että $k_1 = 2,5$ ja $a_b = 1$. Reunapuristuslujuudeksi saadaan kaavan (6.8) mukaan 618,18 kN, joten leikkausvoiman ollessa vain 4,75 kN reunapuristuskestävyys on riittävä.

Ruuveille kohdistuva vetorasitus on kuvan 39 mukainen N_3 ja sen suuruus on 300,50 kN. Kuvassa oleva voima N_3 kohdistuu kummallekin ruuville, joten yhtä ruuvia kohden oleva vetorasitus on puolet voiman suuruudesta eli 150,25 kN.

Ruuvien vetokestävyys määritetään kaavan (6.11) mukaan, jolloin vetokestävyydeksi saadaan 323,14 kN, joten ruuvien vetokestävyys on riittävä.

Ruuvien lävistymiskestävyyteen liittyvät dimensiot e ja s näkyvät kuvassa 36 ja niiden suuruudet ovat: $s = 46$ mm ja $e = 50,85$ mm [11].

Kaavassa (6.12) tarvittava mittatieto d_m lasketaan kaavalla (6.13) ja sen suuruudeksi saadaan 48,42 mm. Kaavaa (6.12) käyttämällä lävistymiskestävyyden mitoitusarvoksi 876,28 kN. Koska ruuvien vetovoima on 150,25 kN, lävistymiskestävyys on riittävä.

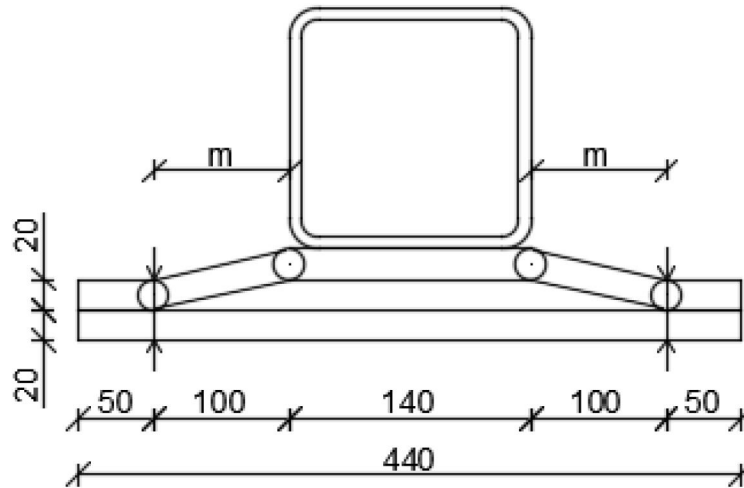
Ruuvien yhdistetty leikkaus- ja vetovoimakestävyys lasketaan kaavalla (6.14). Kaavan mukaiseksi arvoksi saadaan 0,35, joka on pienempi kuin 1, joten yhdistetty leikkaus- ja vetovoimakestävyys on riittävä.

Koska ruuvien leikkauskestävyys 215,40 kN ja reunapuristuskestävyys 566,67 kN ovat suurempia kuin yhden ruuvien leikkausvoima 4,75 kN, ruuvien vetokestävyys 323,14 kN ja ruuvien lävistymiskestävyys 803,25 kN ovat suurempia kuin yhden ruuvien vetorasitus 150,25 kN sekä ruuvien yhdistetyn leikkaus- ja vetokestävyyden käyttöaste on 0,35, ruuviliitos on riittävän kestävä.

6.2.4 Liitoslevyn taivutuskestävyys

Perustelut tälle liitoslevyn taivutuskestävyyden mitoitukselle ovat samat kuin kohdassa 6.1.4.

Kuvassa 38 esitellään ylemmän liitoslevyn oletetut myötöviivat tummilla viivoilla. Todellisuudessa liitoslevy ei taivu tarkalleen kyseisiä myötöviivojen pitkin, mutta tässä työssä oletetaan myötöviivojen olevan kuvan kaltaiset. Nyt levyn taivutuskestävyydessä efektiivisen pituuden l_{eff} voidaan olettaa olevan yhtä suuri kuin liitoslevyn pituus h_p .



Kuva 40 Yläpaarteen ja pilarin välinen liitos takaa kuvattuna, murtumismalli 1

Tässä luvussa tutkitaan levyn kestävyys kolmen eri murtumismallin perusteella, jotka ovat täyden mekanismin syntyminen laipassa, ruuvien murtuminen kun laippa samalla myötää sekä ruuvien murtuminen. Näistä kolmesta määräävin tapaus määrittää laipan kestävyuden. [1]

Kaavassa (6.16) esiintyvät arvot tunnetaan ja kun ne sijoitetaan kaavaan, saadaan plastisen taivutusmomentin arvoksi 9,35 kNm. Kun nyt tunnetut arvot sijoitetaan kaavaan (6.15), saadaan murtumismallin 1 mukaiseksi taivutuskestävyydeksi 374,00 kN. Koska liitosta rasittava kuormitus N_3 on 300,50 kN, liitos kestää kyseisen tapauksen.

Murtumismallin 2 mukainen kestävyys lasketaan kaavalla

$$F_{T.2.Rd} = \frac{2M_{pl.2.Rd} + n \sum F_{t.Rd}}{m + n} \quad (6.19)$$

Tässä tapauksessa, kun kaikki myötöviivat ovat samanpituisia, $M_{pl.2.Rd} = M_{pl.1.Rd}$. $F_{t.Rd}$ on yhden ruuvien vetokestävyuden mitoitusarvo, minkä laskenta on esitetty kaavassa (6.11). $\sum F_{t.Rd}$ on liitoksessa esiintyvien kaikkien ruuvien vetokestävyysien summa. Kaavassa esiintyvä n on mitta ruuvien keskeltä laipan ulkoreunaan, mikä on kuvan 37 mukaisesti 50 mm.

Sijoittamalla tunnetut arvot kaavaan (3.16) saadaan murtumismallin 2 mukaiseksi vetokestävyydeksi 340,09 kN. Kestävyys on murtumismallin 1 mukaista kestävyyttä pienempi, joten se muodostuu tässä tapauksessa määrääväksi.

Murtumismallin 3 mukainen kestävyys lasketaan kaavalla

$$F_{T.3.Rd} = \sum F_{t.Rd} \quad (6.20)$$

Yhden ruuvin vetokestävyyden mitoitusarvoksi tulee 323,14 kN, joten kahden ruuvin vetokestävyys on 646,27 kN. Kestävyys on kahta edellistä suurempi, joten se ei muodostu tässä tapauksessa määrääväksi.

Koska määräävin murtumismallin 2 mukainen kestävyys on 340,09 kN on suurempi kuin rasitus 300,50 kN, liitoslevyn taivutuskestävyys on riittävä.

7. TULOKSET

7.1 Kehämallien ja FEM-analyysien vertailu

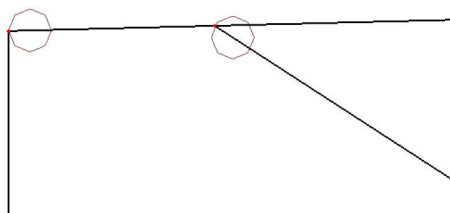
Kolmiulotteinen FEM-analyysi sekä kehäohjelmalla tehty yksiulotteinen FEM-laskenta ovat keskenään erilaisia tutkimusmenetelmiä, joten on mielenkiintoista tietää, kuinka hyvin menetelmät vastaavat toisiaan tulosten perusteella. Rakennemallin sauvoissa olevat normaalivoimat antavat hyvän kuvan siitä, kuinka vertailukelpoisia tuloksia menetelmät antavat. Vertailutulokset on saatu sellaisista kohdista yläpaarretta, diagonaalia ja pilaria, joissa Ansys-mallissa on käytetty sauvaelementtejä (katso kuva 14). Sauvaelementtien kohdalta mallista nähdään yksiselitteisesti kyseisessä rakenneosassa vaikuttava rasitus.

Taulukko 12 sisältää rakenneosien normaalivoimien sekä ruuvien vetovoimien arvot liitoksessa, jossa yläpaarteen ja diagonaalin välistä liitosta ei ole vahvistettu. Prosenttiluvut on saatu vertaamalla kehämallin antamaa tulosta FEM-analyysin antamaan tulokseen. Kyseessä on sama liitos, jota on tutkittu työn kohdissa 3.1, 4.2 ja 6.1. Kehämallin 1 rasitukset on saatu kohdan 3.1 mukaista kehämallia käyttämällä, joka on esitetty myös kuvassa 41. Kehämallin 2 mukaiset versiot 1 ja 2 on esitelty liitteessä 5 sekä kuvissa 42 ja 43. Versio 2 on kohdan 6.1 mukainen kehämalli.

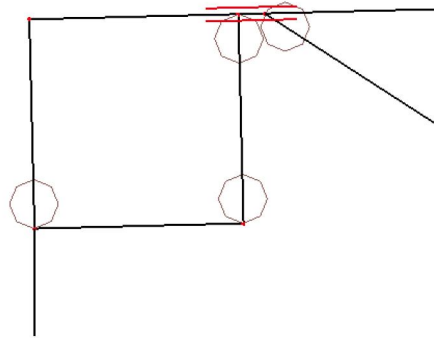
Taulukko 12 Vahvistamattoman liitoksen FEM-analysoinnin sekä eri kehämallien antamat rakenneosien normaalivoimat sekä ruuvien vetovoimat

	Yläpaarre [N]	Diagonaali [N]	Pilari [N]	Ruuvit [N]
FEM	772 330	913 920	552 260	179 560
Kehämalli 1	825 000 (107,8 %)	984 400 (107,7 %)	550 100 (99,6 %)	-
Kehämalli 2-1	753 500 (97,6 %)	886 400 (97,0 %)	553 300 (100,2 %)	192 000 (106,9 %)
Kehämalli 2-2	752 900 (97,5 %)	886 800 (97,0 %)	553 300 (100,2 %)	207 400 (115,5 %)

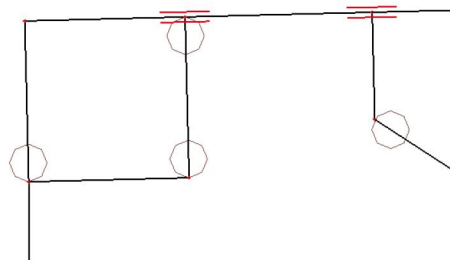
Kuvissa 41, 42 ja 43 on esitetty vahvistamattoman liitoksen eri kehämallit.



Kuva 41 Vahvistamattoman liitoksen kehämalli 1.



Kuva 42 Vahvistamattoman liitoksen kehämalli 2-1



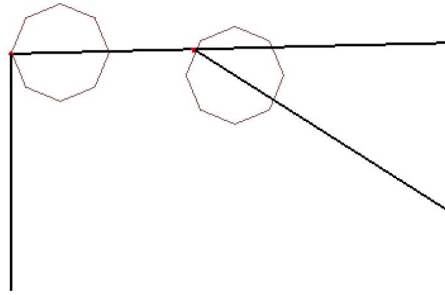
Kuva 43 Vahvistamattoman liitoksen kehämalli 2-2

Taulukko 13 sisältää rakenneosien normaalivoimien sekä ruuvien vetovoimien arvot liitoksessa, jossa yläpaarteen ja diagonaalin välinen liitos on vahvistettu. Kyseessä on sama liitos, jota on tutkittu kohdissa 3.2, 4.3 ja 6.2. Kehämallin 1 rasituksen on saatu kohdan 3.2 mukaista kehämallia käyttämällä, joka näkyy myös kuvassa 44. Kehämallin 2 mukaiset versiot on esitelty liitteessä 5 sekä kuvissa 45, 46 ja 47. Versio 3 on kohdan 6.2 mukainen kehämalli.

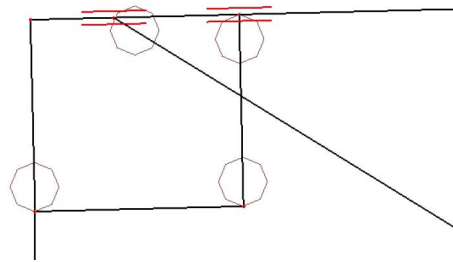
Taulukko 13 Vahvistetun liitoksen FEM-analysoinnin sekä eri kehämallien antamat rakenneosien normaalivoimat sekä ruuvien vetovoimat

	Yläpaarre [N]	Diagonaali [N]	Pilari [N]	Ruuvit [N]
FEM	493 710	579 910	366 910	356 000
Kehämalli 1	547 100 (110,8 %)	649 800 (112,1 %)	365 700 (99,7 %)	-
Kehämalli 2-1	488 400 (98,9 %)	567 000 (97,8 %)	367 900 (100,3 %)	190 200 (53,4 %)
Kehämalli 2-2	492 400 (99,7 %)	576 300 (99,4 %)	367 900 (100,3 %)	204 900 (57,6 %)
Kehämalli 2-3	519 700 (105,3 %)	607 000 (104,7 %)	366 300 (99,8 %)	266 400 (74,8 %)

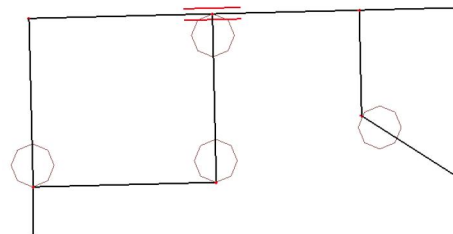
Kuvissa 44, 45, 46 ja 47 on esitetty vahvistetun liitoksen eri kehämallit.



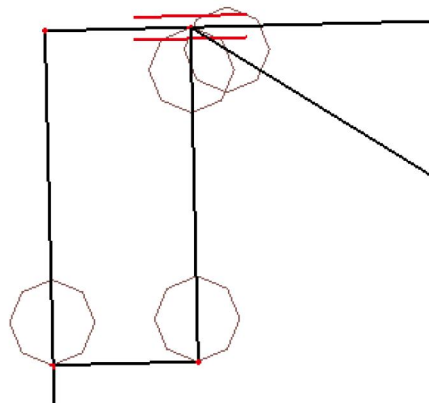
Kuva 44 Vahvistetun liitoksen kehämalli 1



Kuva 45 Vahvistetun liitoksen kehämalli 2-1



Kuva 46 Vahvistetun liitoksen kehämalli 2-2



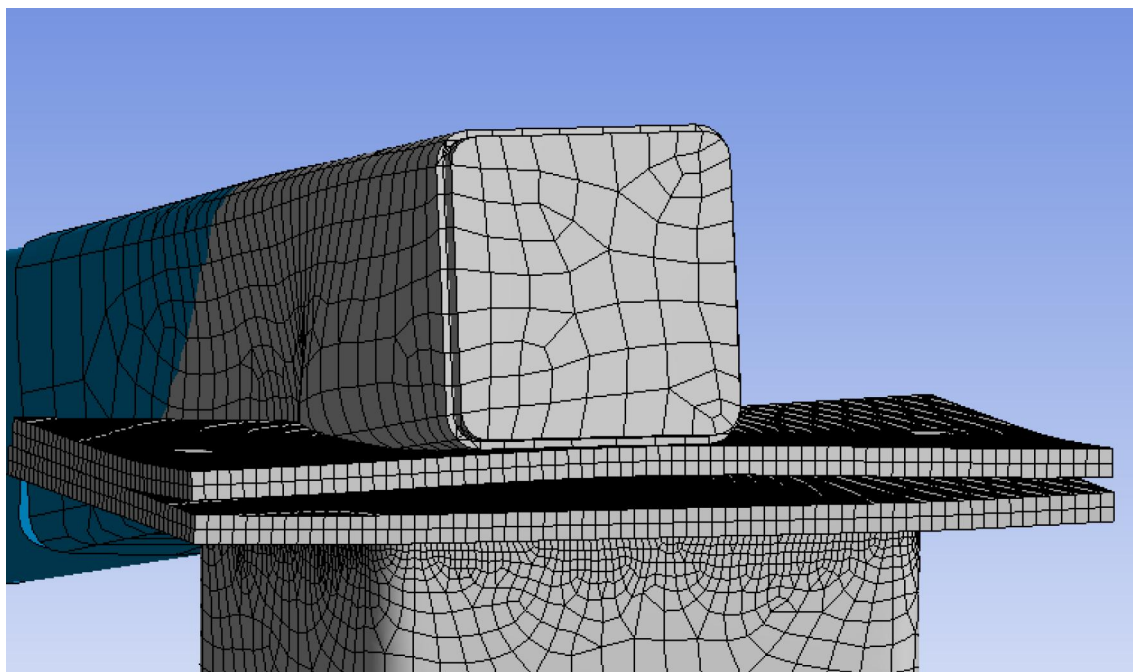
Kuva 47 Vahvistetun liitoksen kehämalli 2-3

Kuvat 41 - 47 on otettu Scia Engineer -ohjelmasta [4], ja ne havainnollistavat ainoastaan laskennassa käytettyjä kehämalleja. Kuvissa olevat pyöreät merkit esittävät niveliä ja kaksi punaista viivaa sauvan molemmiin puolin kuvastaa kyseisessä kohdassa olevan liitos rakenneosien välillä.

Taulukoiden arvoista voidaan havaita, että tavanomaista kehämallia muuttamalla saavutetaan tarkemmat arvot vastaamaan FEM-mallista saatuja arvoja. Vahvistamattoman liitoksen tapauksessa kuvan 43 mukaisella kehämallin 2 versiolla 2 saavutetaan lähimpänä olevat rakenneosien normaalivoimat sekä ruuveihin vaikuttava vetovoima. Vahvistetun liitoksen tapauksessa kuvien 46 ja 47 mukaisilla kehämallin 2 versioilla 2 ja 3 saavutetaan hyvin lähellä FEM-mallin voimia olevat normaalivoimat ja versiolla 3 saadaan myös ruuvien vetovoimat vastaamaan lähimmäksi FEM-mallin antamia voimia.

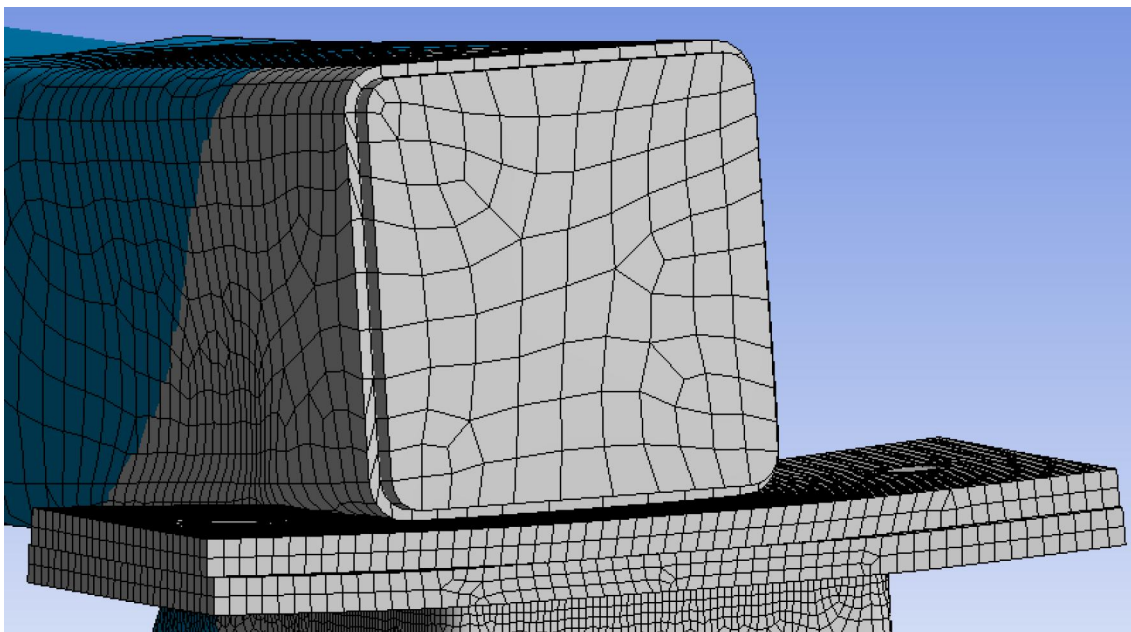
7.2 Yläpaarten ja pilarin leveyssuhteen vaikutus liitoslevyyn

Tutkimuksissa kävi ilmi, että yläpaarten leveydellä suhteessa pilariin on huomattava merkitys liitoslevyjen taipumisessa. Kun yläpaarre on selvästi pilaria kapeampi, liitoslevyt erkanevat toisistaan kuvan 48 mukaisesti. Yläpaarten leveyden lähestyessä pilarin leveyttä, liitoslevyt eivät enää erkane toisistaan vaan alkavat taipumaan yhdessä kuvan 49 mukaisesti. Kuvissa taipuminen on skaalattu kymmenkertaiseksi käyttäytymisen paremmin havainnollistamiseksi.



Kuva 48 Liitoslevyjen erkaantuminen toisistaan

Kuvan 48 liitoksessa yläpaarten leveys on 160 mm ja pilarin leveys 300 mm.



Kuva 49 Liitoslevyjen taipuminen yhdessä

Kuvan 49 liitoksessa yläpaarten leveys on 180 mm ja pilarin leveys 200 mm. Tutkituissa liitoksissa liitoslevyt käyttäytyivät vastaavalla tavalla aina, kun yläpaarten ja pilarin leveyden erotus oli 40 mm tai vähemmän.

Liitoslevyjen alkaessa käyttäytymään kuvan 49 mukaisesti, ruuvien vetovoima tippui murto-osaan vastaavalla kuormituksella olevasta tilanteesta, jossa liitoslevyt käyttäytyivät kuvan 48 mukaisesti. Kuvan 48 liitoksessa yhden ruuvin vetovoimaksi muodostui 35,10 kN kun taas kuvan 49 liitoksessa yhden ruuvin vetovoimaksi muodostui 2,77 kN.

7.3 Diagonaalin ja pilarin välisen vapaavälin tutkiminen

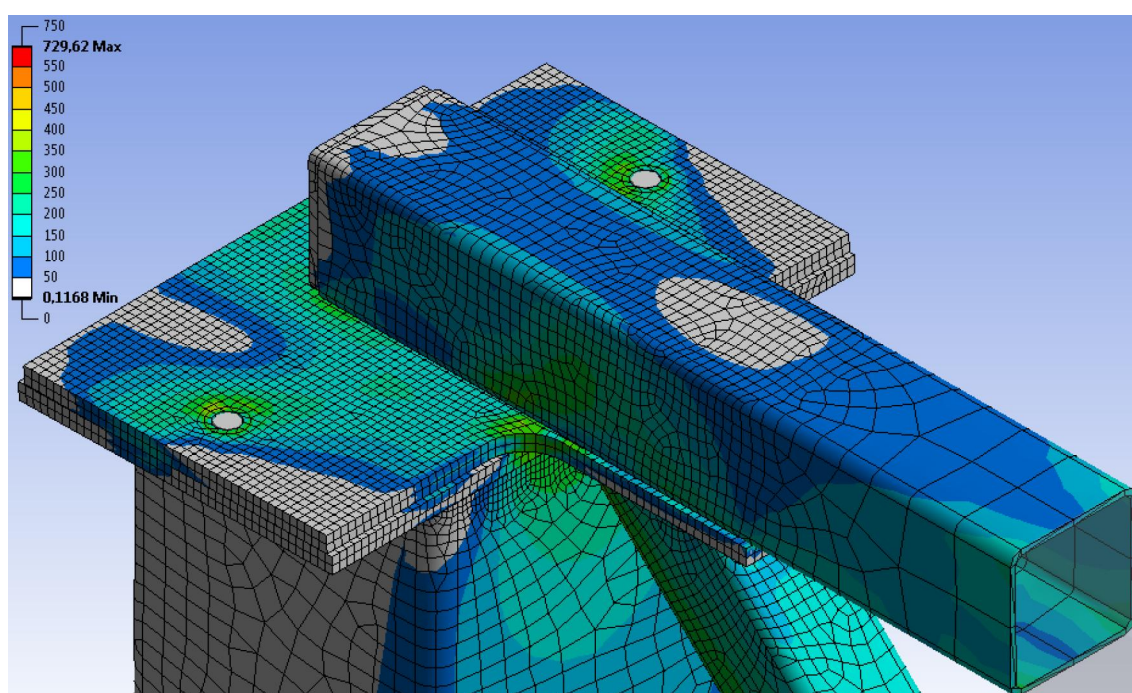
Koska tässä työssä on käytetty diagonaalin ja pilarin välisenä vapaavälinä niin pientä mitta kuin 25 mm, tutkittiin myötöviivateoriaan perustuen diagonaalin murtomekanismia yläpaarten pinnasta. Tutkimuskohteena oli tarkastella, ylittääkö myötöviiva pidemmälle kuin 25 mm, jolloin murtuminen pyrkisi tapahtumaan yläpaarten liitoslevyn alla. Sellaisessa tilanteessa paarten liitoslevy mahdollisesti vahvistaisi diagonaalin ja yläpaarten välistä liitosta. [16]

Liitteessä 6 on esitetty esimerkkilaskelma erään työssä tutkitun liitoksen tiedoilla. Laskelmassa päästiin tulokseen, jossa myötöviiva ulottuu 21,36 mm diagonaalin pinnasta pois päin, jolloin murtuminen myötöviivateoriaan perustuen pääsee tapahtumaan vapaasti, eikä yläpaarten liitoslevy sitä estä.

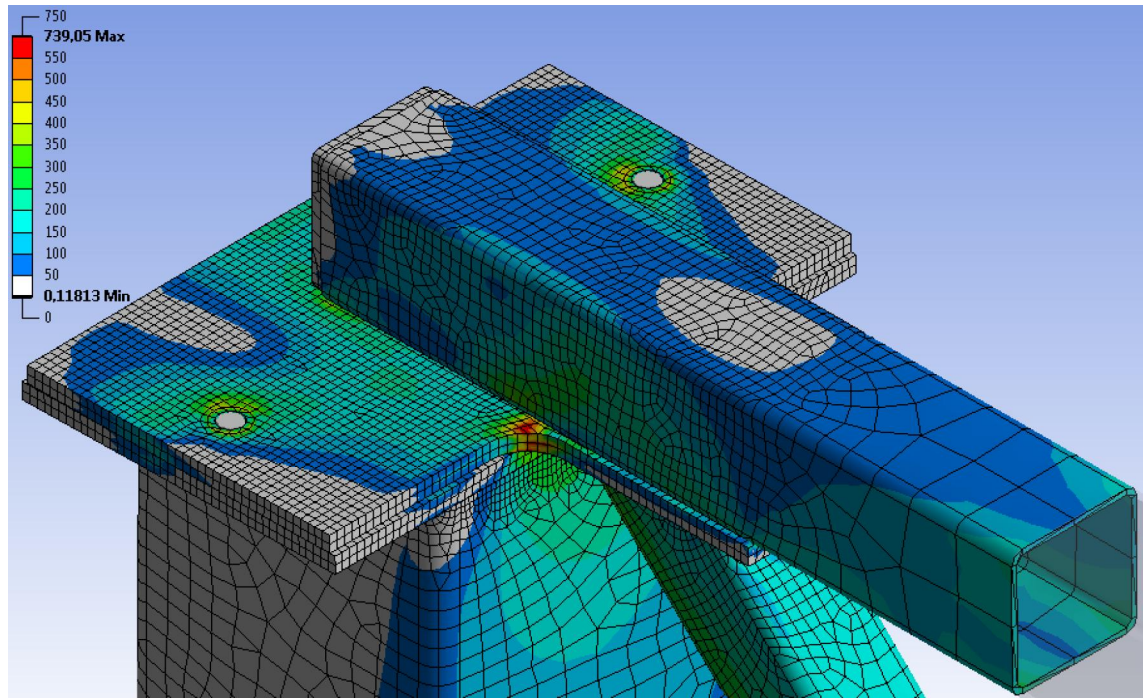
7.4 Diagonaalin ja yläpaarteen välisen liitoksen vahvikelevyn materiaali

Standardi EN 1993-1-8 määrittää, että ristikoissa paarteen ja diagonaalin välisessä liitoksessa toisinaan vaadittavan vahvikelevyn materiaalin on oltava vähintään yhtä lujaa terästä kuin paarre [1]. Koska lujempaa terästä kuin S355-luokan teräs on levyosina hankalammin saatavilla, tutkittiin S355-luokan vahvikelevyn soveltuvuutta liitokseen.

Eri liitoslevymateriaalien vaikutusta liitoksen toimintaan tutkittiin kolmiulotteisella FEM-analyysillä. Kuvissa 50 ja 51 on esitelty kaksi täysin samaa liitosta samoilla kuormituksilla, joissa ainut ero on liitoslevyn materiaali. Kuvassa 50 liitoslevynä käytettiin S355-luokan terästä ja kuvassa 51 S550-luokan terästä.

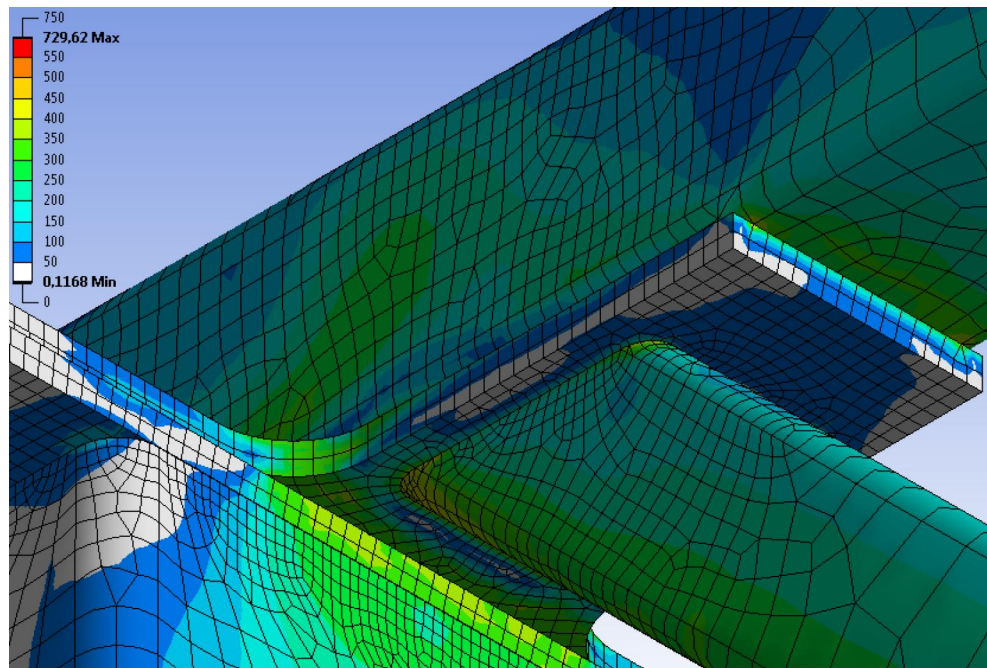


Kuva 50 Rakenneosien von Mises -jännitykset, kun liitoslevyn materiaali on S355

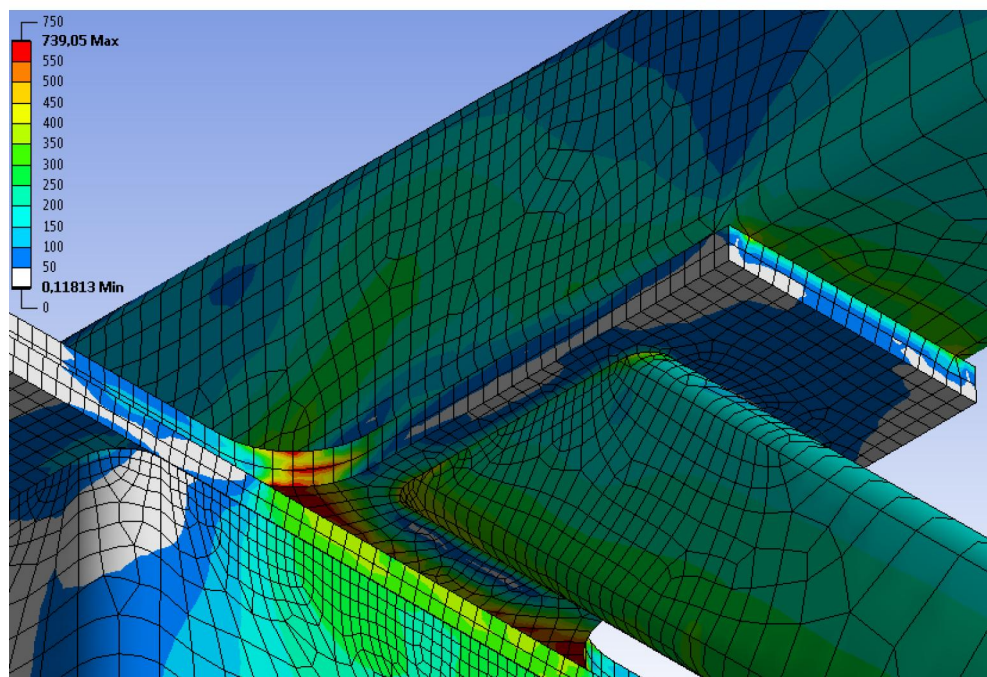


Kuva 51 Rakenneosien von Mises -jännitykset, kuin liitoslevyn materiaali on S550

Kuten kuvia 50 ja 51 vertaamalla huomataan, ei liitoslevyn materiaalilla ole lainkaan vaikutusta yläpaarten ja diagonaalin jännityksiin. Jännitykset kasvavat lujempaa terästä käytettäessä ainoastaan vahvikelevyissä itsessään. Vahvikelevyissä jännitykset kasvavat lähinnä ainoastaan liitoslevyn pyöristysten kohdalla. Lujempaa terästä käytettäessä jännitykset nousevat nurkka-alueilla korkeammalle kuin 550 MPa:a, mutta pienemmän lujuuden omaavassa liitoslevyissä jännitykset pysyvät 550 MPa:n alapuolella myös liitoslevyn nurkkapyöristysten kohdalla. Kuvissa 52 ja 53 on esitetty vastaavat kuvat liitoksen alapuolelta kuvattuna.



Kuva 52 *Rakenneosien von Mises -jännitykset alhaalta, kun liitoslevyn materiaali on S355*



Kuva 53 *Rakenneosien von Mises -jännitykset alhaalta, kun liitoslevyn materiaali on S550*

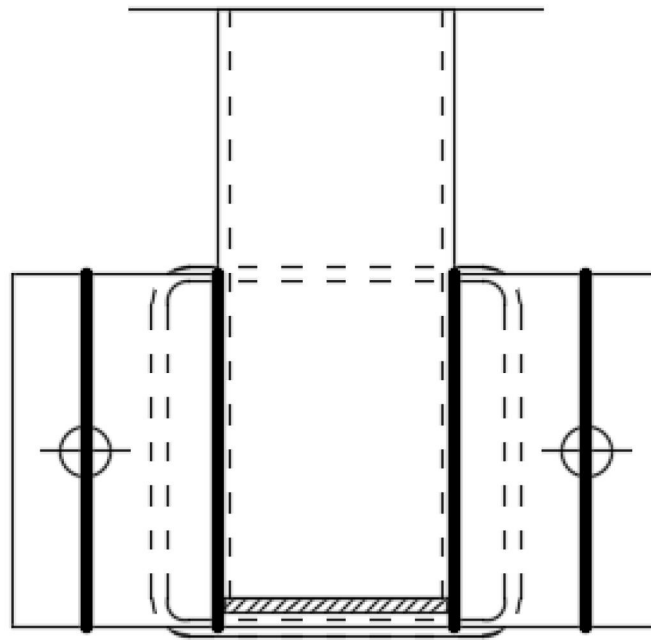
Liitteessä 9 on esitetty useampia kuvia vastaavasta ilmiöstä. Jokaisessa tutkitussa liitoksessa jännitykset käyttäytyivät vastaavalla tavalla, kuin tässä kappaleessa on esitelty.

8. YHTEENVETO

Tutkitun liitoskokonaisuuden tarkka mitoittaminen on erittäin hankalaa ilman tarkempaa analysointia esimerkiksi kolmiulotteisella FEM-analyysillä. Liitoksessa on useita eri komponentteja, jotka tulee mitoittaa mutta joille ei tavanomaisella kehämallilla laskettuna saada selkeitä rasituksia. Esimerkiksi ruuvien tarkka mitoittaminen ei onnistu, koska niille muodostuvien rasitusten määrittäminen on hankalaa. Vaikka laskelmista kävi ilmi, että ruuvien käyttöasteet pysyvät huomattavan alhaisina, tulee niiden kestävyys silti aina tarkistaa. Liitoskokonaisuuden mitoittamisessa kaksi muuta merkittävää mitoitettavaa kohdetta ovat yläpaarteen paikallinen puristuskestävyys sekä liitoslevyjen taivutuskestävyys.

Työssä tutkittu ja kehitetty uusi kehämalli antaa hyvät lähtökohdat edellä mainittujen komponenttien mitoittamiseen. Kehämallilla saadaan selville ruuveissa vaikuttava leikkausvoima sekä vetovoima, mikä on samalla liitoslevyjen taivutuksen aiheuttava voima. Mallilla saadaan myös selville pilarilta tuleva puristusvoima, mikä vaikuttaa yläpaarteen paikalliseen puristuskestävyyteen. Tämä puristusvoima on hyvin varman päällä oleva rasitus, kuten liitteiden 3 ja 4 laskelmista kävi ilmi.

Liitoslevyjen taivutuskestävyyden määrittäminen tarkasti on myös uuden kehämallin avulla hankalaa, koska levyjen taipumisen myötöviivat sekä efektiivinen pituus ovat epätarkkoja. Tässä tutkimuksessa yksinkertaistettiin laskelmaa kolmella oletuksella. Ensimmäiseksi tehtiin oletus, että vain ylempi liitoslevy taipuu alemman pysyessä alkupeiräisessä muodossaan. Tämä oletus perusteltiin sillä, että pilarin leveys on huomattavasti suurempi kuin paarteen, jolloin ylemmällä liitoslevyllä ruuvien etäisyys paarteen pinnasta on huomattavasti suurempi kuin alemmalla levyllä pilarin pinnasta. Tällöin ylempi liitoslevy taipuu herkemmin. Kuten kohdan 4 tuloksista nähdään, tämä oletus on hyvin lähellä todellista tilannetta. Toiseksi oletettiin, että ylempään liitoslevyyn kohdistuu vetorasitus, joka vetää levyä keskeltä suoraan ylöspäin. Viimeisenä oletettiin levyn myötöviivojen eli niiden viivojen, joista levy taipuu, olevan kuvan 54 tummien viivojen mukaiset.



Kuva 54 Liitoslevyn myötöviivat

Tämän tutkimuksen tuloksista saatiin myös lisää tietoa pilarin mitoituseseen. Tavanomaisen kehämallin yläpaarteen ja pilarin välinen liitos, jossa pilarin ja yläpaarteen keskilinjat kohtaavat ja niiden välissä on nivel, ei aiheuta pilarille lainkaan taivutusmomenttia. Näin ei todellisuudessa ole, koska ristikon taipuman johdosta yläpaarre tukeutuu pilarin sisäreunaan ja samalla pilarin keskilinjan kohdalla oleville ruuveille tulee vetorasitusta. Tässä työssä kehitetty uusi kehämalli aiheuttaa pilarille tästä ilmiöstä aiheutuvaa taivutusmomenttia. Pilarin paikalliseen mitoituseseen saatiin myös kohdassa 4 nähtävin tuloksin lisää tietoa. Esimerkiksi kuvan 28 mukaisesti pilarin jännitysjakauman sisäreunalla on rasitetuimmalta kohdalta hyvin kapea. Valtaosa paarteen kautta tulevasta puristuksesta siirtyy pilarin sisäreunalle paarteen leveyden mittaiselle alueelle.

LÄHTEET

- [1] SFS-EN 1993-1-8 Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus, Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2005, 148 s.
- [2] SSAB Domex Tube Rakenneputket, SSAB Europe Oy, 2016, 688 s.
- [3] WINRAMI-ohjelma, Ruukki Construction Oy versio 5.59.700
- [4] SCIA Engineer -ohjelma, Nemetschek Group versio 16.1
- [5] SFS-EN 1990 Eurokoodi: Rakenteiden suunnitteluperusteet, Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2006, 184 s.
- [6] Suomen rakentamismääräyskokoelma: Rakenteiden lujuus ja vakaus - kantavien rakenteiden suunnitteluperusteet, Ympäristöministeriö, 2016, 24 s.
- [7] RIL 201-1-2017 Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2017, 210 s.
- [8] SFS-EN 1993-1-12 Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-12: EN 1993 laajennus teräslajeihin S700 asti, Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2007, 11s.
- [9] SFS-EN 1993-1-1 Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2005, 99 s.
- [10] Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus – eurocode 3 oppikirja, Teräsrakenneyhdistys ry, 2010, 183 s.
- [11] SFS-EN ISO 4014 Hexagon head bolts. Product grades A and B, Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2011, 14 s.
- [12] Ansys Mechanical -ohjelma, Ansys Inc, versio 18.0
- [13] ANSYS Help Viewer, SAS IP Inc versio 18.0.0
- [14] MAOL-taulukot, Matemaattisten Aineiden Opettajien Liitto MAOL ry, 1995, 157 s.
- [15] SFS-EN 1993-1-5 Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-5: Levyrakenteet, Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2006, 57 s.
- [16] E. Niemi, Rakenteiden Mekaniikka, vol 18, no. 4, 1985, s. 95–116.

LIITTEET

Liite 1: Vahvistamaton yläpaarteen ja diagonaalin liitos, kehämalli 1 (11 sivua)

Liite 2: Vahvistettu yläpaarteen ja diagonaalin liitos, kehämalli 1 (12 sivua)

Liite 3: Vahvistamaton yläpaarteen ja diagonaalin liitos, kehämalli 2 (21 sivua)

Liite 4: Vahvistettu yläpaarteen ja diagonaalin liitos, kehämalli 2 (22 sivua)

Liite 5: Ruuvien vetovoima ja venymäelementtien poikkileikkausala (9 sivua)

Liite 6: Vapaavälin tutkiminen (3 sivua)

Liite 7: Mallinnettujen liitosten parametrit (1 sivu)

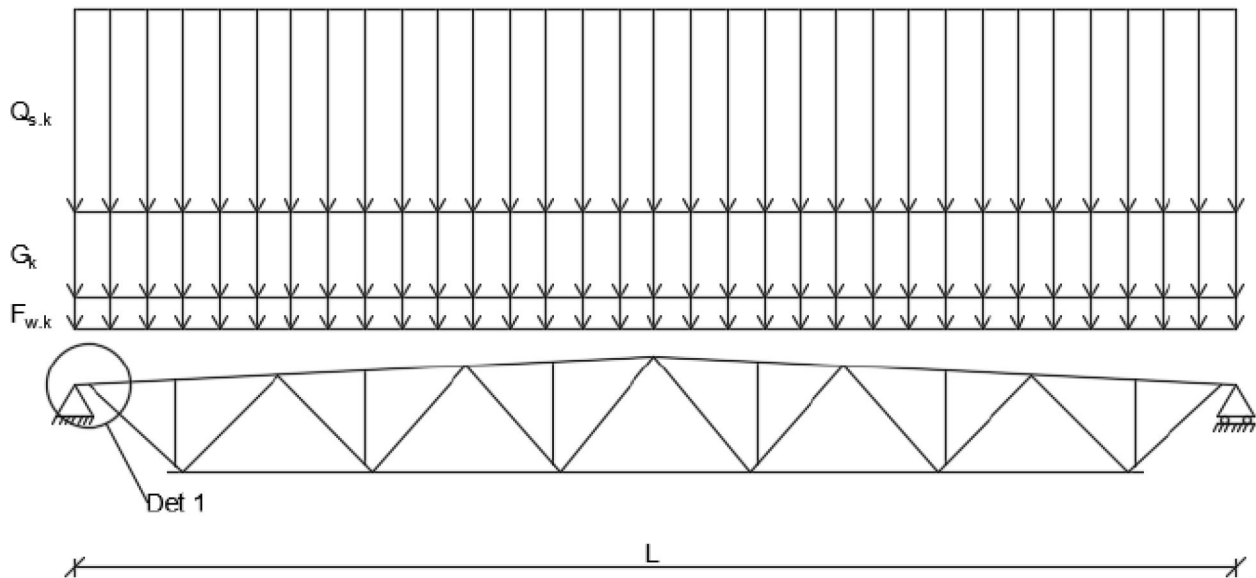
Liite 8: FEM-mallien tuloksuvia (8 sivua)

Liite 9: FEM-mallien tuloksuvia, vahvikelevyn materiaali (6 sivua)

VAHVISTAMATON YLÄPAARTEEN JA DIAGONAALIN LIITOS KEHÄMALLI 1

LÄHTÖTIEDOT

Ristikön kuormitukset:



Ristikön jänneväli: $L_t := 24000 \text{ mm}$

Ristikön omapaino: $m_t := 2086.8 \text{ kg}$

$$G_{1,k} := \frac{m_t \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{L_t} = \frac{2086.8 \cdot \text{kg} \cdot 9.81 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{24000 \cdot \text{mm}} = 0.85 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

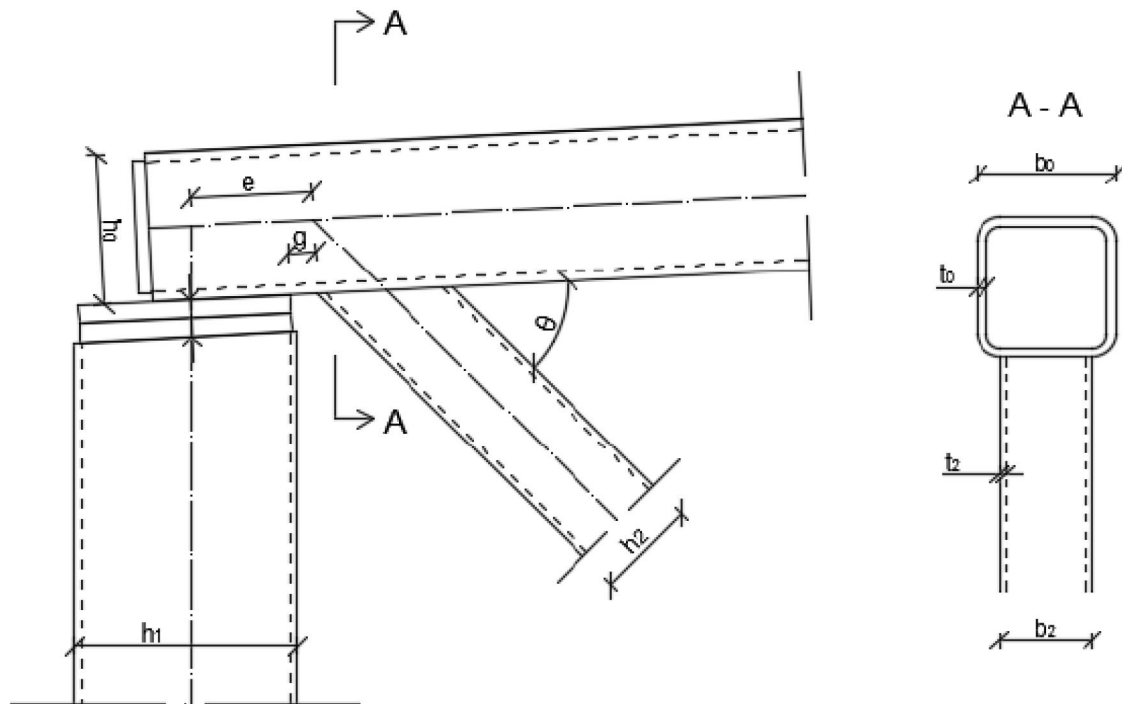
Katon omapaino $G_{2,k} := 6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Lumikuorma: $Q_{s,k} := 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Tuulikuorma: $F_{w,k} := 2.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Ristikön kokonaiskuorma: $p_{Ed} := 1.15 \cdot G_{1,k} + 1.15 \cdot G_{2,k} + 1.5 \cdot Q_{s,k} + 0.6 \cdot 1.5 \cdot F_{w,k} = 45.77 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Liitoksen rasitukset ja parametrit



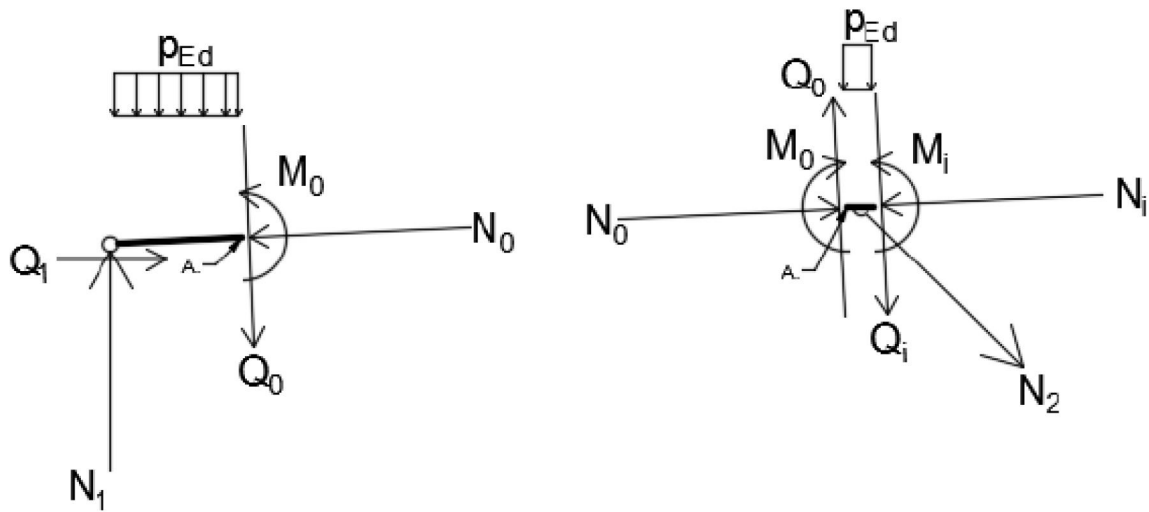
Paarresauva $h_0 := 160\text{mm}$ $b_0 := 160\text{mm}$ $t_0 := 8\text{mm}$ $r_0 := 20\text{mm}$ $A_0 := 4644.25\text{mm}^2$
 $I_0 := 1741.23 \times 10^4\text{mm}^4$ $W_{el,0} := 217654\text{mm}^3$ $W_{pl,0} := 260140\text{mm}^3$
 myötöraja $f_{y,0} := 550\text{MPa}$ vetomurtolujuus $f_{u,0} := 600\text{MPa}$

Uumasauva $h_2 := 140\text{mm}$ $b_2 := 140\text{mm}$ $t_2 := 7.1\text{mm}$ $r_2 := 17.8\text{mm}$ $A_2 := 3601.27\text{mm}^2$
 $I_2 := 1031.71 \cdot 10^4\text{mm}^4$ $W_{el,2} := 147387 \cdot 10^3\text{mm}^3$ $W_{pl,2} := 176320\text{mm}^3$
 myötöraja $f_{y,2} := 420\text{MPa}$ vetomurtolujuus $f_{u,2} := 500\text{MPa}$

Pilari: $h_1 := 250\text{mm}$ $b_1 := 250\text{mm}$ $t_1 := 10\text{mm}$

Materiaalitiedot: $E := 210\text{GPa}$ $\gamma_{M0} := 1.00$ $\gamma_{M1} := 1.00$ $\gamma_{M2} := 1.25$ $\gamma_{M5} := 1.00$

Mitat: Vapaaväli $g := 25\text{mm}$ Uumasauvan kulma $\theta := 33^\circ$
 Epäkeskisyyys $e := 135\text{mm}$ Yläpaarteen kulma $\alpha := 1.4^\circ$



Kuva: Vapaakappalekuvat liitoksesta

Paarresauvan normaalivoima	$N_{0.Ed} := 12200\text{N}$ (puristusta)
Pilarin normaalivoima	$N_{1.Ed} := 549400\text{N}$ (puristusvoima)
Uumasauvan normaalivoima	$N_{2.Ed} := 984400\text{N}$ (vetoa)
Paarresauvan leikkausvoima	$Q_{0.Ed} := 543200\text{N}$
Paarresauvan taivutusmomentti	$M_{0.Ed} := 73.80\text{kN}\cdot\text{m}$

Rakenneosien rasitukset on määritetty SCIA Engineer 16.1 -ohjelmalla.

Rakenneosien poikkileikkausluokat

Paarresauva: $\epsilon := \sqrt{\frac{235\text{MPa}}{f_{y,0}}} = \sqrt{\frac{235\cdot\text{MPa}}{550\cdot\text{MPa}}} = 0.65$ $\text{PLL1_raja} := 33\cdot\epsilon = 33\cdot0.65 = 21.57$
 $\text{PLL2_raja} := 38\cdot\epsilon = 38\cdot0.65 = 24.84$
 $\text{PLL3_raja} := 42\cdot\epsilon = 42\cdot0.65 = 27.45$

Huom! Tarkastelu pelkästään puristettuna osana (tulos varmalla puolella)

$c := h_0 - 2\cdot r_0 = 160\cdot\text{mm} - 2\cdot 20\cdot\text{mm} = 120\cdot\text{mm}$ $\text{suhde}_{ct} := \frac{c}{t_0} = \frac{0.12\cdot\text{m}}{8\cdot\text{mm}} = 15$

Poikkileikkausluokka $\text{PLL}_0 := \begin{cases} 3 & \text{if } \text{suhde}_{ct} \leq \text{PLL3_raja} \\ 2 & \text{if } \text{suhde}_{ct} \leq \text{PLL2_raja} \\ 1 & \text{if } \text{suhde}_{ct} \leq \text{PLL1_raja} \\ 4 & \text{otherwise} \end{cases}$

Poikkileikkausluokka $\text{PLL}_0 = 1$

Uumasauva: $\epsilon := \sqrt{\frac{235\text{MPa}}{f_{y,2}}} = \sqrt{\frac{235\cdot\text{MPa}}{f_{y,2}}} = 0.75$ $\text{PLL1_raja} := 33\cdot\epsilon = 33\cdot0.75 = 24.68$
 $\text{PLL2_raja} := 38\cdot\epsilon = 38\cdot0.75 = 28.42$
 $\text{PLL3_raja} := 42\cdot\epsilon = 42\cdot0.75 = 31.42$

Huom! Tarkastelu pelkästään puristettuna osana (tulos varmalla puolella)

$c := h_2 - 2\cdot r_2 = 140\cdot\text{mm} - 2\cdot 17.8\cdot\text{mm} = 104.4\cdot\text{mm}$ $\text{suhde}_{ct} := \frac{c}{t_2} = \frac{0.10\cdot\text{m}}{7.10\cdot\text{mm}} = 14.70$

Poikkileikkausluokka $\text{PLL}_2 := \begin{cases} 3 & \text{if } \text{suhde}_{ct} \leq \text{PLL3_raja} \\ 2 & \text{if } \text{suhde}_{ct} \leq \text{PLL2_raja} \\ 1 & \text{if } \text{suhde}_{ct} \leq \text{PLL1_raja} \\ 4 & \text{otherwise} \end{cases}$

Poikkileikkausluokka $\text{PLL}_2 = 1$

Liitoksen mitoitusmuoto (K/N-liitos tai Y-liitos)

Voimassaoloehdot K/N-liitokselle:

Liitos ei voi käyttäytyä K/N-liitoksen tavoin, koska b_1 on suurempi kuin b_0 . Tällöin K-liitoksen myötöviivakuovioita ei pääse syntymään. Liitos mitoitetaan Y-liitoksena.

Voimassaoloehdot Y-liitokselle:

Liitos:

$$30^\circ \leq \theta \leq 90^\circ = 30^\circ \leq 33^\circ \leq 90^\circ$$

Toteutuminen = "OK"

$$t_0 \geq 2.5 \text{ mm} \rightarrow 8 \cdot \text{mm} \geq 2.5 \cdot \text{mm}$$

Toteutuminen = "OK"

$$t_1 \geq 2.5 \text{ mm} \rightarrow 10 \cdot \text{mm} \geq 2.5 \cdot \text{mm}$$

Toteutuminen = "OK"

$$t_2 \geq 2.5 \text{ mm} \rightarrow 7.1 \cdot \text{mm} \geq 2.5 \cdot \text{mm}$$

Toteutuminen = "OK"

Uumasauvat:

$$\frac{b_2}{b_0} = \frac{140 \cdot \text{mm}}{160 \cdot \text{mm}} = 0.88 \quad \frac{b_2}{b_0} \geq 0.25$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{b_2}{t_2} = \frac{140 \cdot \text{mm}}{7.1 \cdot \text{mm}} = 19.72 \quad \frac{b_2}{t_2} \leq 35$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{h_1}{t_1} = \frac{250 \cdot \text{mm}}{10 \cdot \text{mm}} = 25 \quad \frac{h_1}{t_1} \leq 35$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{h_2}{t_2} = \frac{140 \cdot \text{mm}}{7.1 \cdot \text{mm}} = 19.72 \quad \frac{h_2}{t_2} \leq 35$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{h_2}{b_2} = \frac{140 \cdot \text{mm}}{140 \cdot \text{mm}} = 1 \quad 0.5 \leq \frac{h_2}{b_2} \leq 2.0$$

Toteutuminen = "OK"

Paarresauva:

$$\frac{b_0}{t_0} = \frac{160 \cdot \text{mm}}{8 \cdot \text{mm}} = 20 \quad \frac{b_0}{t_0} \leq 35$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{h_0}{t_0} = \frac{160 \cdot \text{mm}}{8 \cdot \text{mm}} = 20 \quad \frac{h_0}{t_0} \leq 35$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{h_0}{b_0} = \frac{160 \cdot \text{mm}}{160 \cdot \text{mm}} = 1 \quad 0.5 \leq \frac{h_0}{b_0} \leq 2.0$$

Toteutuminen = "OK"

PAARRESAUVAN JA UUMASAUVAN VÄLINEN LIITOS

Kestävyyskerroin $k_k = 0.8$ Kestävyyskerroin on 0,8, kun teräslaatu on S550 [SFS-EN 1993-1-8]

Paarteen pinnan murtuminen myötäämällä

Paarteen pinnan normaaliännitykseen vaikuttaa paarteen puristusännitys sekä taivutusmomentin aiheuttama taivutusännitys.

Normaalivoima: $N_{0.Ed} = 12200 \cdot N$ (SCIA Engineer 16.1)

Puristuksesta aiheutuva ännitys: $\sigma_{N.0} := \frac{N_{0.Ed}}{A_0} = \frac{12200 \cdot N}{4644.25 \cdot \text{mm}^2} = 2.63 \cdot \text{MPa}$

Taivutuksesta aiheutuva ännitys: $\sigma_{M.0} := \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0}} = \frac{73.8 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}}{217654 \cdot \text{mm}^3} = 339.07 \cdot \text{MPa}$

Paarteen pinnan normaaliännitys: $\sigma := \sigma_{M.0} + \sigma_{N.0} = 3.39 \times 10^8 \cdot \text{Pa} + 2.63 \times 10^6 \cdot \text{Pa} = 341.70 \cdot \text{MPa}$

Paarre on vedetty: $k_n := 1.0$

$$\beta := \frac{b_2}{b_0} = \frac{140 \cdot \text{mm}}{160 \cdot \text{mm}} = 0.88$$

$$\eta := \frac{h_2}{b_0} = \frac{140 \cdot \text{mm}}{160 \cdot \text{mm}} = 0.88$$

$$N_{2.Rd} := k_k \cdot \frac{\frac{k_n \cdot f_{y.0} \cdot t_0^2}{(1 - \beta) \cdot \sin(\theta)} \cdot \left(\frac{2 \cdot \eta}{\sin(\theta)} + 4 \cdot \sqrt{1 - \beta} \right)}{\gamma_{M5}} = 0.8 \cdot \frac{\frac{1 \cdot 550 \cdot \text{MPa} \cdot (8 \cdot \text{mm})^2}{(1 - 0.88) \cdot \sin(33^\circ)} \cdot \left(\frac{2 \cdot 0.88}{\sin(33^\circ)} + 4 \cdot \sqrt{1 - 0.88} \right)}{1}$$

$N_{2.Rd} = 1914.02 \cdot \text{kN}$ (S550: Kestävyyskerroin 0,8)

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pinnan_murtuminen}} := \frac{N_{2.Ed}}{N_{2.Rd}} = \frac{984400 \cdot N}{1914019 \cdot N}$$

$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pinnan_murtuminen}} = 0.51$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen

Tehollinen leveys:

$$b_{e,p} := \frac{\frac{10}{b_0} \cdot b_2}{t_0} = \frac{10}{\frac{160 \cdot \text{mm}}{8 \cdot \text{mm}}} \cdot 140 \cdot \text{mm} = 70 \cdot \text{mm}$$

$$b_{e,p} := \min(b_{e,p}, b_2) = \min(0.07 \cdot \text{m}, 140 \cdot \text{mm}) = 0.07 \text{ m}$$

$$N_{2,Rd} := k_k \cdot \frac{\frac{f_{y,0} \cdot t_0}{\sqrt{3} \cdot \sin(\theta)} \cdot \left(\frac{2 \cdot h_2}{\sin(\theta)} + 2 \cdot b_{e,p} \right)}{\gamma_{M5}} = 0.8 \cdot \frac{550 \cdot \text{MPa} \cdot 8 \cdot \text{mm} \cdot \left(\frac{2 \cdot 140 \cdot \text{mm}}{\sin(33^\circ)} + 2 \cdot 0.07 \cdot \text{m} \right)}{1}$$

$$N_{2,Rd} = 2440724.31 \cdot \text{N} \quad (\text{S550: Kestävyyskerroin } 0,8)$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{lävistysleikkautuminen}} := \frac{N_{2,Ed}}{N_{2,Rd}} = \frac{984400 \cdot \text{N}}{2440724 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{lävistysleikkautuminen}} = 0.40$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Paarteen uuman lommahtaminen tai myötääminen

Paarteen sivun lommahduslujuus: $f_b := f_{y,0} = 550 \cdot \text{MPa}$ (vedetty paarre)

$$N_{2,Rd} := k_k \cdot \frac{\frac{f_b \cdot t_0}{\sin(\theta)} \cdot \left(\frac{2 \cdot h_2}{\sin(\theta)} + 10 \cdot t_0 \right)}{\gamma_{M5}} = 1 \cdot \frac{6 \times 10^8 \cdot \text{Pa} \cdot 8 \cdot \text{mm} \cdot \left(\frac{2 \cdot 140 \cdot \text{mm}}{\sin(33^\circ)} + 10 \cdot 8 \cdot \text{mm} \right)}{1}$$

$$N_{2,Rd} = 3839678.75 \cdot \text{N} \quad (\text{S550: Kestävyyskerroin } 0,8)$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uuman_myötääminen}} := \frac{N_{2,Ed}}{N_{2,Rd}} = \frac{984400 \cdot \text{N}}{3839679 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uuman_myötääminen}} = 0.26$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Uumasauvan murtuminen myötäämällä

$$\text{Uumasauvan tehollinen leveys } b_{\text{eff}} := \frac{10}{b_0} \cdot \frac{f_{y,0} \cdot t_0}{f_{y,2} \cdot t_2} \cdot b_2 = \frac{10}{\frac{160 \cdot \text{mm}}{8 \cdot \text{mm}}} \cdot \frac{550 \cdot \text{MPa} \cdot 8 \cdot \text{mm}}{420 \cdot \text{MPa} \cdot 7.1 \cdot \text{mm}} \cdot 140 \cdot \text{mm} = 103.29 \cdot \text{mm}$$

$$b_{\text{eff}} := \min(b_{\text{eff}}, b_2) = \min(0.1033 \cdot \text{m}, 140 \cdot \text{mm}) = 0.1033 \text{ m}$$

$$N_{2,Rd} := k_k \cdot \frac{f_{y,2} \cdot t_2 \cdot (2 \cdot h_2 - 4 \cdot t_2 + 2 \cdot b_{\text{eff}})}{\gamma_{M5}} = 0.8 \cdot \frac{420 \cdot \text{MPa} \cdot 7.1 \cdot \text{mm} \cdot (2 \cdot 140 \cdot \text{mm} - 4 \cdot 7.1 \cdot \text{mm} + 2 \cdot 0.103 \cdot \text{m})}{1}$$

$$N_{2,Rd} = 1093016.96 \cdot \text{N}$$

(S550: Kestävyyskerroin 0,8)

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uumasauvan_murtuminen}} := \frac{N_{2,Ed}}{N_{2,Rd}} = \frac{984400 \cdot \text{N}}{1093017 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uumasauvan_murtuminen}} = 0.90$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Liitoksen kestävyys:

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pinnan_murtuminen}} = 0.51$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{lävistysleikkautuminen}} = 0.40$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uuman_myötääminen}} = 0.26$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uumasauvan_murtuminen}} = 0.90$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{liitos}} = 0.90$$

YLÄPAARTEEN KESTÄVYYS TUELLAYläpaarteen päätä rasittavat voimat

Leikkausvoima $Q_{0.Ed} = 543.2 \cdot \text{kN}$

Taivutusmomentti $M_{0.Ed} = 73.8 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

Normaalivoima $N_{0.Ed} = 12.2 \cdot \text{kN}$

Taivutuskestävyys

Taivutuskestävyyden mitoitusarvo: $M_{pl.Rd} := \frac{W_{pl.0} \cdot f_{y.0}}{\gamma_{M0}} = \frac{2.6 \times 10^5 \cdot \text{mm}^3 \cdot 550 \cdot \text{MPa}}{1}$

$$M_{pl.Rd} = 143.08 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus}} := \frac{M_{0.Ed}}{M_{pl.Rd}} = \frac{73.8 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}}{143077 \cdot \text{N} \cdot \text{m}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus}} = 0.52$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Puristuskestävyys

Puristuskestävyyden mitoitusarvo: $N_{c.Rd} := \frac{A_0 \cdot f_{y.0}}{\gamma_{M0}} = \frac{4644.25 \cdot \text{mm}^2 \cdot 550 \cdot \text{MPa}}{1}$

$$N_{c.Rd} = 2554.34 \cdot \text{kN}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{puristus}} := \frac{N_{0.Ed}}{N_{c.Rd}} = \frac{12200 \cdot \text{N}}{2554338 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{puristus}} = 0.00478$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Taivutuksen ja normaaliveiman yhteisvaikutus

$$N_{0.25.Rd} := 0.25 \cdot N_{c.Rd} = 0.25 \cdot 2.55 \times 10^6 \cdot N = 638.58 \cdot kN$$

$$N_{0.Ed} \leq N_{0.25.Rd} = 12200.00 \cdot N \leq 638584.38 \cdot N$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

$$N_{0.5.Rd} := \frac{0.5 \cdot h_0 \cdot t_0 \cdot f_{y,0}}{\gamma_{M0}} = \frac{0.5 \cdot 160 \cdot mm \cdot 8 \cdot mm \cdot 550 \cdot MPa}{1} = 352 \cdot kN$$

$$N_{0.Ed} \leq N_{0.5.Rd} = 12200 \cdot N \leq 352000 \cdot N$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"Taivutusmomentin ja normaaliveiman yhteisvaikutus: **YHTEISVAIKUTUS = "EI TARVITSE TUTKIA!"**

Leikkauskestävyys

Leikkauspinta-ala:
$$A_v := \frac{A_0 \cdot h_0}{b_0 + h_0} = \frac{4644.25 \cdot \text{mm}^2 \cdot 160 \cdot \text{mm}}{160 \cdot \text{mm} + 160 \cdot \text{mm}} = 2322.13 \cdot \text{mm}^2$$

Leikkauskestävyyden mitoitusarvo:
$$V_{pl.Rd} := \frac{A_v \cdot \left(\frac{f_{y,0}}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} = \frac{0.00232 \cdot \text{m}^2 \cdot \frac{550 \cdot \text{MPa}}{\sqrt{3}}}{1}$$

$$V_{pl.Rd} = 737.37 \cdot \text{kN}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{leikkaus}} := \frac{Q_{0.Ed}}{V_{pl.Rd}} = \frac{543200 \cdot \text{N}}{737374 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{leikkaus}} = 0.74$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Taivutusmomentin ja leikkausvoiman yhteisvaikutus: YHTEISVAIKUTUS = "TUTKITTAVA!"

Taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutus

Taivutusvastuksen pienennystekijä:
$$\rho := \left(\frac{2 \cdot Q_{0.Ed}}{V_{pl.Rd}} - 1 \right)^2 = \left(\frac{2 \cdot 543200 \cdot \text{N}}{737373.72 \cdot \text{N}} - 1 \right)^2 = 0.22$$

Taivutusmomentin ja leikkauskestävyyden yhteisvaikutuksen mitoitusarvo:

$$M_{v.Rd} := \left(W_{pl,0} - \frac{\rho \cdot A_v^2}{8 \cdot t_0} \right) \left(\frac{f_{y,0}}{\gamma_{M0}} \right) = \left[2.6014 \times 10^5 \cdot \text{mm}^3 - \frac{0.22405 \cdot (0.00232 \cdot \text{m}^2)^2}{8 \cdot 8 \cdot \text{mm}} \right] \cdot \frac{550 \cdot \text{MPa}}{1}$$

$$M_{v.Rd} = 132.69 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus_ja_leikkaus}} := \frac{M_{0.Ed}}{M_{v.Rd}} = \frac{73.8 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}}{132694.67 \cdot \text{N} \cdot \text{m}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus_ja_leikkaus}} = 0.56$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Liitoksen kestävyys

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{puristus}} = 0.005$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus}} = 0.52$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{leikkaus}} = 0.74$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus_ja_puristus}} = 0.4$$

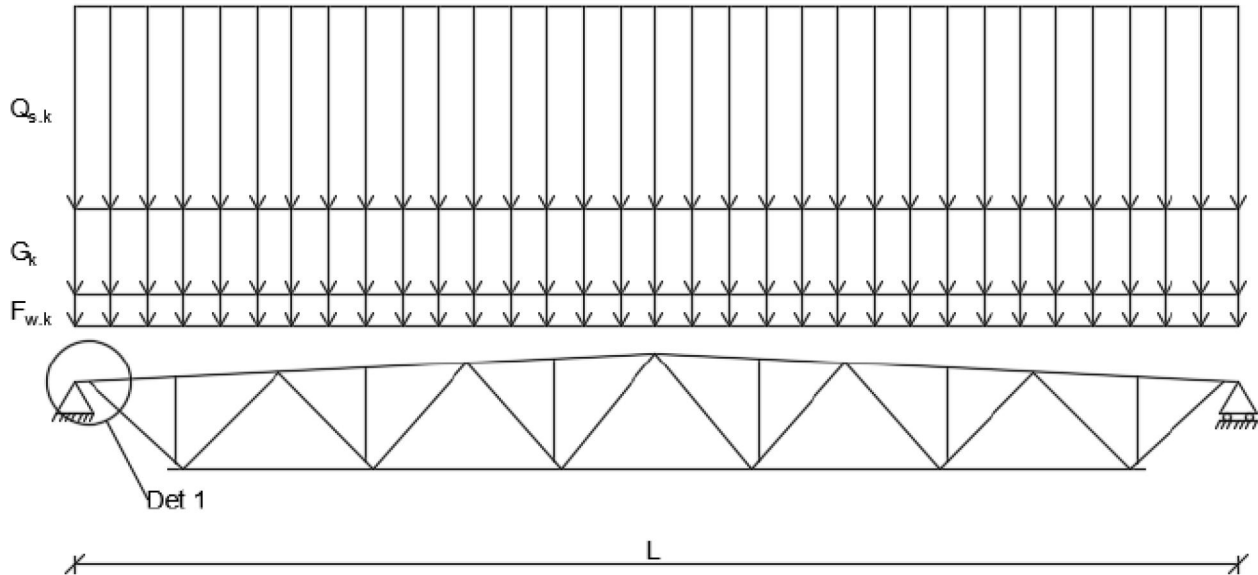
$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus_ja_leikkaus}} = 0.56$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{liitos}} = 0.74$$

VAHVISTETTU YLÄPAARTEEN JA DIAGONAALIN LIITOS KEHÄMALLI 1

LÄHTÖTIEDOT

Ristikön kuormitukset:



Ristikön jänneväli: $L_t := 24000 \text{ mm}$

Ristikön omapaino: $m_t := 1311.7 \text{ kg}$

$$G_{1,k} := \frac{m_t \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{L_t} = \frac{1311.7 \cdot \text{kg} \cdot 9.81 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{24000 \cdot \text{mm}} = 0.54 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

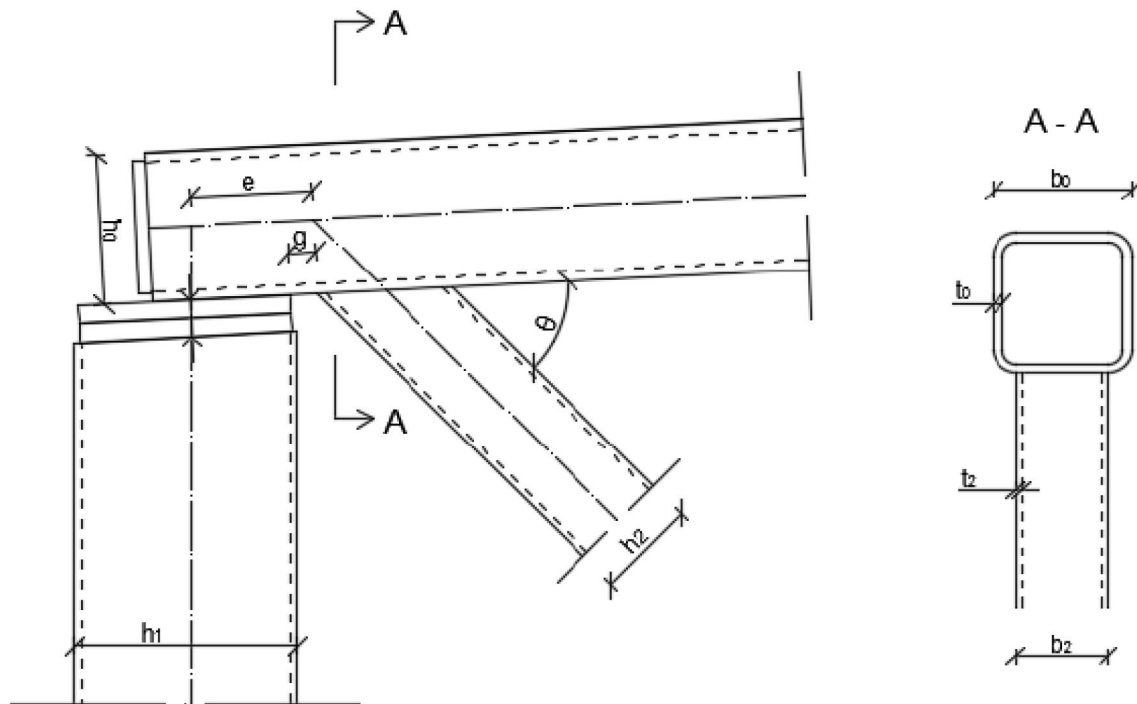
Katon omapaino: $G_{2,k} := 6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Lumikuorma: $Q_{s,k} := 14 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Tuulikuorma: $F_{w,k} := 2.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Ristikön kokonaiskuorma: $p_{Ed} := 1.15 \cdot G_{1,k} + 1.15 \cdot G_{2,k} + 1.5 \cdot Q_{s,k} + 0.6 \cdot 1.5 \cdot F_{w,k} = 30.41 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Liitoksen rasitukset ja parametrit



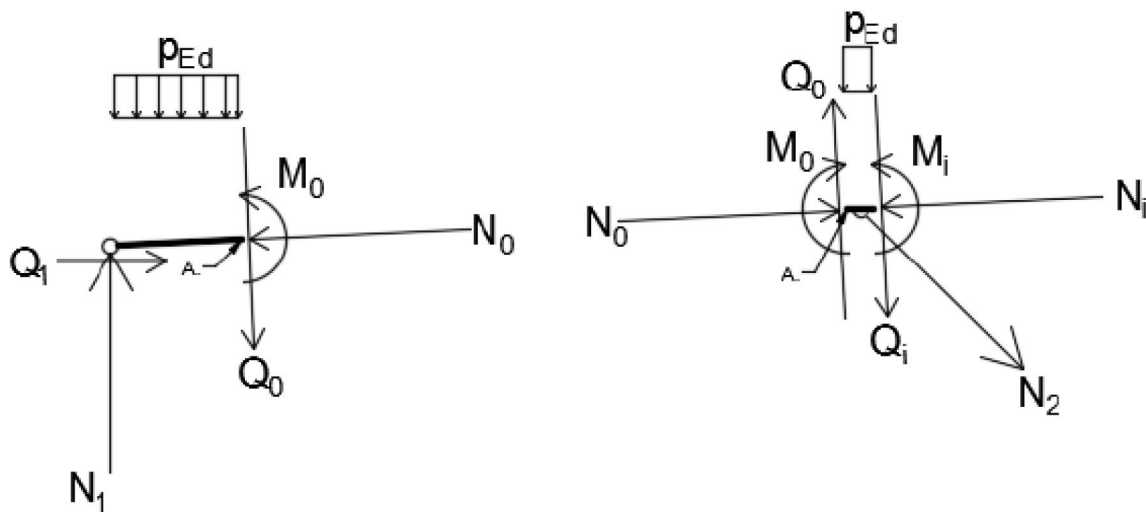
Paarresauva $h_0 := 140\text{mm}$ $b_0 := 140\text{mm}$ $t_0 := 6\text{mm}$ $r_0 := 12\text{mm}$ $A_0 := 3123.29\text{mm}^2$
 $I_0 := 920.43 \times 10^4 \text{mm}^4$ $W_{el,0} := 131490\text{mm}^3$ $W_{pl,0} := 155330\text{mm}^3$
 myötöraja $f_{y,0} := 550\text{MPa}$ vetomurtolujuus $f_{u,0} := 600\text{MPa}$

Uumasauva $h_2 := 100\text{mm}$ $b_2 := 100\text{mm}$ $t_2 := 5\text{mm}$ $r_2 := 10\text{mm}$ $A_2 := 1835.62\text{mm}^2$
 $I_2 := 271.10 \cdot 10^4 \text{mm}^4$ $W_{el,2} := 54220\text{mm}^3$ $W_{pl,2} := 64590\text{mm}^3$
 myötöraja $f_{y,2} := 420\text{MPa}$ vetomurtolujuus $f_{u,2} := 500\text{MPa}$

Pilari: $h_1 := 250\text{mm}$ $b_1 := 250\text{mm}$ $t_1 := 10\text{mm}$

Materiaalitiedot: $E := 210\text{GPa}$ $\gamma_{M0} := 1.00$ $\gamma_{M1} := 1.00$ $\gamma_{M2} := 1.25$ $\gamma_{M5} := 1.00$

Mitat: Vapaaväli $g := 25\text{mm}$ Uumasauvan kulma $\theta := 33^\circ$
 Epäkeskisyyss $e := 135\text{mm}$ Yläpaarteen kulma $\alpha := 1.4^\circ$



Kuva: Vapaakappalekuvat liitoksesta

Paarresauvan normaalivoima	$N_{0.Ed} := 7700\text{N}$	(puristusta)
Pilarin normaalivoima	$N_{1.Ed} := 365000\text{N}$	(puristusvoima)
Uumasauvan normaalivoima	$N_{2.Ed} := 649900\text{N}$	(vetoa)
Paarresauvan leikkausvoima	$Q_{0.Ed} := 361700\text{N}$	
Paarresauvan taivutusmomentti	$M_{0.Ed} := 38.1\text{kN}\cdot\text{m}$	

Rakenneosien rasitukset on määritetty SCIA Engineer 16.1 -ohjelmalla.

Rakenneosien poikkileikkausluokat

Paarresauva: $\varepsilon := \sqrt{\frac{235\text{MPa}}{f_{y,0}}} = \sqrt{\frac{235\cdot\text{MPa}}{550\cdot\text{MPa}}} = 0.65$

PLL1_raja := $33 \cdot \varepsilon = 33 \cdot 0.65 = 21.57$

PLL2_raja := $38 \cdot \varepsilon = 38 \cdot 0.65 = 24.84$

PLL3_raja := $42 \cdot \varepsilon = 42 \cdot 0.65 = 27.45$

Huom! Tarkastelu pelkästään puristettuna osana (tulos varmalla puolella)

$c := h_0 - 2 \cdot r_0 = 140 \cdot \text{mm} - 2 \cdot 12 \cdot \text{mm} = 116 \cdot \text{mm}$ $\text{suhde}_{ct} := \frac{c}{t_0} = \frac{0.12 \cdot \text{m}}{6 \cdot \text{mm}} = 19.33$

Poikkileikkausluokka $PLL_0 :=$ $\begin{cases} 3 & \text{if } \text{suhde}_{ct} \leq PLL3_raja \\ 2 & \text{if } \text{suhde}_{ct} \leq PLL2_raja \\ 1 & \text{if } \text{suhde}_{ct} \leq PLL1_raja \\ 4 & \text{otherwise} \end{cases}$

Poikkileikkausluokka $PLL_0 = 1$

Uumasauva: $\varepsilon := \sqrt{\frac{235\text{MPa}}{f_{y,2}}} = \sqrt{\frac{235\cdot\text{MPa}}{f_{y,2}}} = 0.75$

PLL1_raja := $33 \cdot \varepsilon = 33 \cdot 0.75 = 24.68$

PLL2_raja := $38 \cdot \varepsilon = 38 \cdot 0.75 = 28.42$

PLL3_raja := $42 \cdot \varepsilon = 42 \cdot 0.75 = 31.42$

Huom! Tarkastelu pelkästään puristettuna osana (tulos varmalla puolella)

$c := h_2 - 2 \cdot r_2 = 100 \cdot \text{mm} - 2 \cdot 10 \cdot \text{mm} = 80 \cdot \text{mm}$ $\text{suhde}_{ct} := \frac{c}{t_2} = \frac{0.08 \cdot \text{m}}{5 \cdot \text{mm}} = 16$

Poikkileikkausluokka $PLL_2 :=$ $\begin{cases} 3 & \text{if } \text{suhde}_{ct} \leq PLL3_raja \\ 2 & \text{if } \text{suhde}_{ct} \leq PLL2_raja \\ 1 & \text{if } \text{suhde}_{ct} \leq PLL1_raja \\ 4 & \text{otherwise} \end{cases}$

Poikkileikkausluokka $PLL_2 = 1$

Liitoksen mitoitusmuoto (K/N-liitos tai Y-liitos)

Voimassaoloehdot K/N-liitokselle:

Liitos ei voi käyttäytyä K/N-liitoksen tavoin, koska b_1 on suurempi kuin b_0 . Tällöin K-liitoksen myötöviivakuovioita ei pääse syntymään. Liitos mitoitetaan Y-liitoksena.

Voimassaoloehdot Y-liitokselle:

Liitos:

$$30^\circ \leq \theta \leq 90^\circ = 30^\circ \leq 33^\circ \leq 90^\circ$$

Toteutuminen = "OK"

$$t_0 \geq 2.5 \text{ mm} \rightarrow 6 \cdot \text{mm} \geq 2.5 \cdot \text{mm}$$

Toteutuminen = "OK"

$$t_1 \geq 2.5 \text{ mm} \rightarrow 10 \cdot \text{mm} \geq 2.5 \cdot \text{mm}$$

Toteutuminen = "OK"

$$t_2 \geq 2.5 \text{ mm} \rightarrow 5 \cdot \text{mm} \geq 2.5 \cdot \text{mm}$$

Toteutuminen = "OK"

Uumasauvat:

$$\frac{b_2}{b_0} = \frac{100 \cdot \text{mm}}{140 \cdot \text{mm}} = 0.71$$

$$\frac{b_2}{b_0} \geq 0.25$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{b_2}{t_2} = \frac{100 \cdot \text{mm}}{5 \cdot \text{mm}} = 20$$

$$\frac{b_2}{t_2} \leq 35$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{h_1}{t_1} = \frac{250 \cdot \text{mm}}{10 \cdot \text{mm}} = 25$$

$$\frac{h_1}{t_1} \leq 35$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{h_2}{t_2} = \frac{100 \cdot \text{mm}}{5 \cdot \text{mm}} = 20$$

$$\frac{h_2}{t_2} \leq 35$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{h_2}{b_2} = \frac{100 \cdot \text{mm}}{100 \cdot \text{mm}} = 1$$

$$0.5 \leq \frac{h_2}{b_2} \leq 2.0$$

Toteutuminen = "OK"

Paarresauva:

$$\frac{b_0}{t_0} = \frac{140 \cdot \text{mm}}{6 \cdot \text{mm}} = 23.33$$

$$\frac{b_0}{t_0} \leq 35$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{h_0}{t_0} = \frac{140 \cdot \text{mm}}{6 \cdot \text{mm}} = 23.33$$

$$\frac{h_0}{t_0} \leq 35$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{h_0}{b_0} = \frac{140 \cdot \text{mm}}{140 \cdot \text{mm}} = 1$$

$$0.5 \leq \frac{h_0}{b_0} \leq 2.0$$

Toteutuminen = "OK"

PAARRESAUVAN JA UUMASAUVAN VÄLINEN LIITOS

Kestävyyskerroin $k_k = 0.8$ Kestävyyskerroin on 0,8, kun teräslaatu on S550 [SFS-EN 1993-1-8]

Paarteen pinnan murtuminen myötäämällä

Paarteen pinnan normaali-jännitykseen vaikuttaa paarteen puristusjännitys sekä taivutusmomentin aiheuttama taivutusjännitys.

Normaalivoima: $N_{0.Ed} = 7700 \cdot N$ (SCIA Engineer 16.1)

Puristuksesta aiheutuva jännitys: $\sigma_{N.0} := \frac{N_{0.Ed}}{A_0} = \frac{7700 \cdot N}{3123.29 \cdot \text{mm}^2} = 2.47 \cdot \text{MPa}$

Taivutuksesta aiheutuva jännitys: $\sigma_{M.0} := \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0}} = \frac{38.1 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}}{131490 \cdot \text{mm}^3} = 289.76 \cdot \text{MPa}$

Paarteen pinnan normaali-jännitys: $\sigma := \sigma_{M.0} - \sigma_{N.0} = 289755874.97 \cdot \text{Pa} - 2465349.04 \cdot \text{Pa} = 287.29 \cdot \text{MPa}$

Paarre on vedetty: $k_n := 1.0$

$$\beta := \frac{b_2}{b_0} = \frac{100 \cdot \text{mm}}{140 \cdot \text{mm}} = 0.71$$

$$\eta := \frac{h_2}{b_0} = \frac{100 \cdot \text{mm}}{140 \cdot \text{mm}} = 0.71$$

$$N_{2.Rd} := k_k \cdot \frac{\frac{k_n \cdot f_{y.0} \cdot t_0^2}{(1 - \beta) \cdot \sin(\theta)} \cdot \left(\frac{2 \cdot \eta}{\sin(\theta)} + 4 \cdot \sqrt{1 - \beta} \right)}{\gamma_{M5}} = 0.8 \cdot \frac{\frac{1 \cdot 550 \cdot \text{MPa} \cdot (6 \cdot \text{mm})^2}{(1 - 0.71) \cdot \sin(33^\circ)} \cdot \left(\frac{2 \cdot 0.71}{\sin(33^\circ)} + 4 \cdot \sqrt{1 - 0.71} \right)}{1}$$

$N_{2.Rd} = 484.64 \cdot \text{kN}$ (S550: Kestävyyskerroin 0,8)

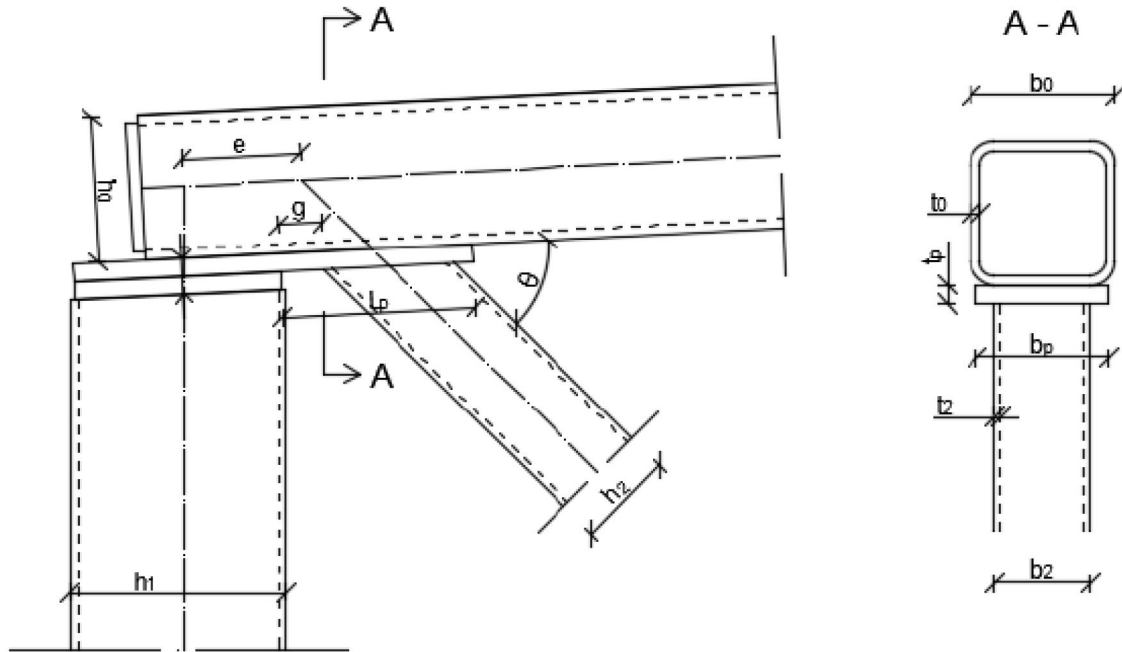
$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pinnan_murtuminen}} := \frac{N_{2.Ed}}{N_{2.Rd}} = \frac{649900 \cdot \text{N}}{484639 \cdot \text{N}}$$

$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pinnan_murtuminen}} = 1.34$

KÄYTTÖASTE = "EI KESTÄ!"

Paarteen pinnan murtuminen myötäämällä, vahvistettu liitos

Koska paarteen pinta ei kestä, vahvistetaan liitosta hitsaamalla paarteen pintaan levy. Levy on esitettyä alla olevissa kuvissa.



Vahvikelevy

$$b_p := 170\text{mm} \quad L_p := 300\text{mm} \quad t_p := 20\text{mm}$$

$$\text{myötöraja } f_{y,p} := 550\text{MPa} \quad \text{vetomurtolujuus } f_{u,p} := 600\text{MPa}$$

Voimassaoloehdot

$$f_{y,p} \geq f_{y,0} = 550\text{MPa} \geq 550\text{MPa}$$

$$b_0 - 2 \cdot t_0 = 140\text{mm} - 2 \cdot 6\text{mm} = 128\text{mm}$$

$$2 \cdot t_2 = 2 \cdot 5\text{mm} = 10\text{mm}$$

$$b_p \geq b_0 - 2 \cdot t_0$$

$$t_p \geq 2 \cdot t_2$$

Toteutuminen = "OK"

Toteutuminen = "OK"

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{h_2}{\sin(\theta)} + \sqrt{b_p \cdot (b_p - b_2)} = \frac{100\text{mm}}{\sin(33^\circ)} + \sqrt{170\text{mm} \cdot (170\text{mm} - 100\text{mm})} = 292.69\text{mm}$$

$$L_p \geq \frac{h_2}{\sin(\theta)} + \sqrt{b_p \cdot (b_p - b_2)}$$

Toteutuminen = "OK"

Tekijä β

$$\beta_p := \frac{b_2}{b_p} = \frac{100\text{mm}}{170\text{mm}} = 0.59$$

Tekijä η

$$\eta_p := \frac{h_2}{b_p} = \frac{100\text{mm}}{170\text{mm}} = 0.59$$

Paarteen pinnan kestävyys:

$$N_{2,Rd} := k_k \cdot \frac{k_n \cdot f_{y,p} \cdot t_p^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \eta_p}{\sin(\theta)} + 4 \cdot \sqrt{1 - \beta_p} \right)}{(1 - \beta_p) \cdot \sin(\theta) \cdot \gamma_{M5}} = 0.8 \cdot \frac{1 \cdot 550 \cdot \text{MPa} \cdot (20 \cdot \text{mm})^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot 0.59}{\sin(33^\circ)} + 4 \cdot \sqrt{1 - 0.59} \right)}{(1 - 0.59) \cdot \sin(33^\circ) \cdot 1}$$

$$N_{2,Rd} = 3709.59 \cdot \text{kN}$$

(S550: Kestävyyskerroin 0,8)

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pinnan_murtuminen}} := \frac{N_{2,Ed}}{N_{2,Rd}} = \frac{649900 \cdot \text{N}}{3709594 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pinnan_murtuminen}} = 0.18$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen, vahvistettu liitos

Tehollinen leveys:

$$b_{e,p} := \frac{10}{\frac{b_p}{t_p}} \cdot b_2 = \frac{10}{\frac{170 \cdot \text{mm}}{20 \cdot \text{mm}}} \cdot 100 \cdot \text{mm} = 117.65 \cdot \text{mm}$$

$$b_{e,p} := \min(b_{e,p}, b_2) = \min(0.118 \cdot \text{m}, 100 \cdot \text{mm}) = 0.1 \cdot \text{m}$$

$$N_{2,Rd} := k_k \cdot \frac{f_{y,p} \cdot t_p \cdot \left(\frac{2 \cdot h_2}{\sin(\theta)} + 2 \cdot b_{e,p} \right)}{\sqrt{3} \cdot \sin(\theta) \cdot \gamma_{M5}} = 0.8 \cdot \frac{550 \cdot \text{MPa} \cdot 20 \cdot \text{mm} \cdot \left(\frac{2 \cdot 100 \cdot \text{mm}}{\sin(33^\circ)} + 2 \cdot 0.1 \cdot \text{m} \right)}{\sqrt{3} \cdot \sin(33^\circ) \cdot 1}$$

$$N_{2,Rd} = 5291289.42 \cdot \text{N}$$

(S550: Kestävyyskerroin 0,8)

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{lävistysleikkautuminen}} := \frac{N_{2,Ed}}{N_{2,Rd}} = \frac{649900 \cdot \text{N}}{5291289 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{lävistysleikkautuminen}} = 0.12$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Paarteen uuman lommahtaminen tai myötääminen

Paarteen sivun lommahduslujuus: $f_b := f_{y,0} = 550 \cdot \text{MPa}$ (vedetty paarre)

$$N_{2,Rd} := k_k \cdot \frac{f_b \cdot t_0 \cdot \left(\frac{2 \cdot h_2}{\sin(\theta)} + 10 \cdot t_0 \right)}{\sin(\theta) \cdot \gamma_{M5}} = 0.8 \cdot \frac{550000000 \cdot \text{Pa} \cdot 6 \cdot \text{mm} \cdot \left(\frac{2 \cdot 100 \cdot \text{mm}}{\sin(33^\circ)} + 10 \cdot 6 \cdot \text{mm} \right)}{\sin(33^\circ) \cdot 1}$$

$$N_{2,Rd} = 2070820.04 \cdot \text{N}$$

(S550: Kestävyyskerroin 0,8)

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uuman_myötääminen}} := \frac{N_{2,Ed}}{N_{2,Rd}} = \frac{649900 \cdot \text{N}}{2070820 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uuman_myötääminen}} = 0.31$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Uumasauvan murtuminen myötäämällä, vahvistettu liitos

$$b_{\text{eff}} := \frac{10}{\frac{b_p}{t_p}} \cdot \frac{f_{y,p} \cdot t_p}{f_{y,2} \cdot t_2} \cdot b_2 = \frac{10}{\frac{170 \cdot \text{mm}}{20 \cdot \text{mm}}} \cdot \frac{550 \cdot \text{MPa} \cdot 20 \cdot \text{mm}}{420 \cdot \text{MPa} \cdot 5 \cdot \text{mm}} \cdot 100 \cdot \text{mm} = 616.25 \cdot \text{mm}$$

$$b_{\text{eff}} := \min(b_{\text{eff}}, b_2) = \min(0.62 \cdot \text{m}, 100 \cdot \text{mm}) = 0.1 \text{ m}$$

$$N_{2,Rd} := k_k \cdot \frac{f_{y,2} \cdot t_2 \cdot (2 \cdot h_2 - 4 \cdot t_2 + 2 \cdot b_{\text{eff}})}{\gamma_{M5}} = 0.8 \cdot \frac{420 \cdot \text{MPa} \cdot 5 \cdot \text{mm} \cdot (2 \cdot 100 \cdot \text{mm} - 4 \cdot 5 \cdot \text{mm} + 2 \cdot 0.1 \cdot \text{m})}{1}$$

$$N_{2,Rd} = 651000 \cdot \text{N} \quad (\text{S550: Kestävyyskerroin } 0,8)$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uumasauvan_murtuminen}} := \frac{N_{2,Ed}}{N_{2,Rd}} = \frac{649900 \cdot \text{N}}{651000 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uumasauvan_murtuminen}} = 0.998$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Liitoksen kestävyys:

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pinnan_murtuminen}} = 0.18$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{lävistysleikkautuminen}} = 0.12$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uuman_myötääminen}} = 0.31$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uumasauvan_murtuminen}} = 0.998$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{liitos}} = 0.998$$

YLÄPAARTEEN KESTÄVYYS TUELLA

Yläpaarteen päätä rasittavat voimat

Leikkausvoima $Q_{0.Ed} = 361.7 \cdot \text{kN}$

Taivutusmomentti $M_{0.Ed} = 38.1 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

Normaalivoima $N_{0.Ed} = 7.7 \cdot \text{kN}$

Taivutuskestävyys

Taivutuskestävyyden mitoitusarvo: $M_{pl.Rd} := \frac{W_{pl.0} \cdot f_{y.0}}{\gamma_{M0}} = \frac{155330 \cdot \text{mm}^3 \cdot 550 \cdot \text{MPa}}{1}$

$$M_{pl.Rd} = 85.43 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus}} := \frac{M_{0.Ed}}{M_{pl.Rd}} = \frac{38.10 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}}{85431.50 \cdot \text{N} \cdot \text{m}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus}} = 0.45$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Puristuskestävyys

Puristuskestävyyden mitoitusarvo: $N_{c.Rd} := \frac{A_0 \cdot f_{y.0}}{\gamma_{M0}} = \frac{3123.29 \cdot \text{mm}^2 \cdot 550 \cdot \text{MPa}}{1}$

$$N_{c.Rd} = 1717.81 \cdot \text{kN}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{puristus}} := \frac{N_{0.Ed}}{N_{c.Rd}} = \frac{7700 \cdot \text{N}}{1717809.5 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{puristus}} = 0.0045$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Taivutuksen ja normaaliveiman yhteisvaikutus

$$N_{0.25.Rd} := 0.25 \cdot N_{c.Rd} = 0.25 \cdot 1717809.5 \cdot N = 429.45 \cdot kN$$

$$N_{0.Ed} \leq N_{0.25.Rd} = 7700 \cdot N \leq 429452.375 \cdot N$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

$$N_{0.5.Rd} := \frac{0.5 \cdot h_0 \cdot t_0 \cdot f_{y,0}}{\gamma_{M0}} = \frac{0.5 \cdot 140 \cdot mm \cdot 6 \cdot mm \cdot 550 \cdot MPa}{1} = 231 \cdot kN$$

$$N_{0.Ed} \leq N_{0.5.Rd} = 7700 \cdot N \leq 231000 \cdot N$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Taivutusmomentin ja normaaliveiman yhteisvaikutus:

YHTEISVAIKUTUS = "EI TARVITSE TUTKIA!"



Leikkauskestävyys

Leikkauspinta-ala:
$$A_v := \frac{A_0 \cdot h_0}{b_0 + h_0} = \frac{3123.29 \cdot \text{mm}^2 \cdot 140 \cdot \text{mm}}{140 \cdot \text{mm} + 140 \cdot \text{mm}} = 1561.64 \cdot \text{mm}^2$$

Leikkauskestävyyden mitoitusarvo:
$$V_{pl.Rd} := \frac{A_v \cdot \left(\frac{f_{y,0}}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} = \frac{0 \cdot \text{m}^2 \cdot \frac{550 \cdot \text{MPa}}{\sqrt{3}}}{1}$$

$$V_{pl.Rd} = 495.89 \cdot \text{kN}$$

$$KÄYTTÖASTE_{leikkaus} := \frac{Q_{0.Ed}}{V_{pl.Rd}} = \frac{361700 \cdot \text{N}}{495888.888620748 \cdot \text{N}}$$

$$KÄYTTÖASTE_{leikkaus} = 0.73$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Taivutusmomentin ja leikkausvoiman yhteisvaikutus: YHTEISVAIKUTUS = "TUTKITTAVA!"

Taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutus

Taivutusvastuksen pienennystekijä:
$$\rho := \left(\frac{2 \cdot Q_{0.Ed}}{V_{pl.Rd}} - 1 \right)^2 = \left(\frac{2 \cdot 361700 \cdot \text{N}}{495888.89 \cdot \text{N}} - 1 \right)^2 = 0.21$$

Taivutusmomentin ja leikkauskestävyyden yhteisvaikutuksen mitoitusarvo:

$$M_{v.Rd} := \left(W_{pl,0} - \frac{\rho \cdot A_v^2}{8 \cdot t_0} \right) \left(\frac{f_{y,0}}{\gamma_{M0}} \right) = \left[155330 \cdot \text{mm}^3 - \frac{0.2105 \cdot (0.0016 \cdot \text{m}^2)^2}{8 \cdot 6 \cdot \text{mm}} \right] \cdot \frac{550 \cdot \text{MPa}}{1}$$

$$M_{v.Rd} = 79.55 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$KÄYTTÖASTE_{taivutus_ja_leikkaus} := \frac{M_{0.Ed}}{M_{v.Rd}} = \frac{38.1 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}}{79549.53 \cdot \text{N} \cdot \text{m}}$$

$$KÄYTTÖASTE_{taivutus_ja_leikkaus} = 0.48$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Liitoksen kestävyys

$$KÄYTTÖASTE_{puristus} = 0.004$$

$$KÄYTTÖASTE_{taivutus} = 0.45$$

$$KÄYTTÖASTE_{leikkaus} = 0.73$$

$$KÄYTTÖASTE_{taivutus_ja_puristus} = 0.34$$

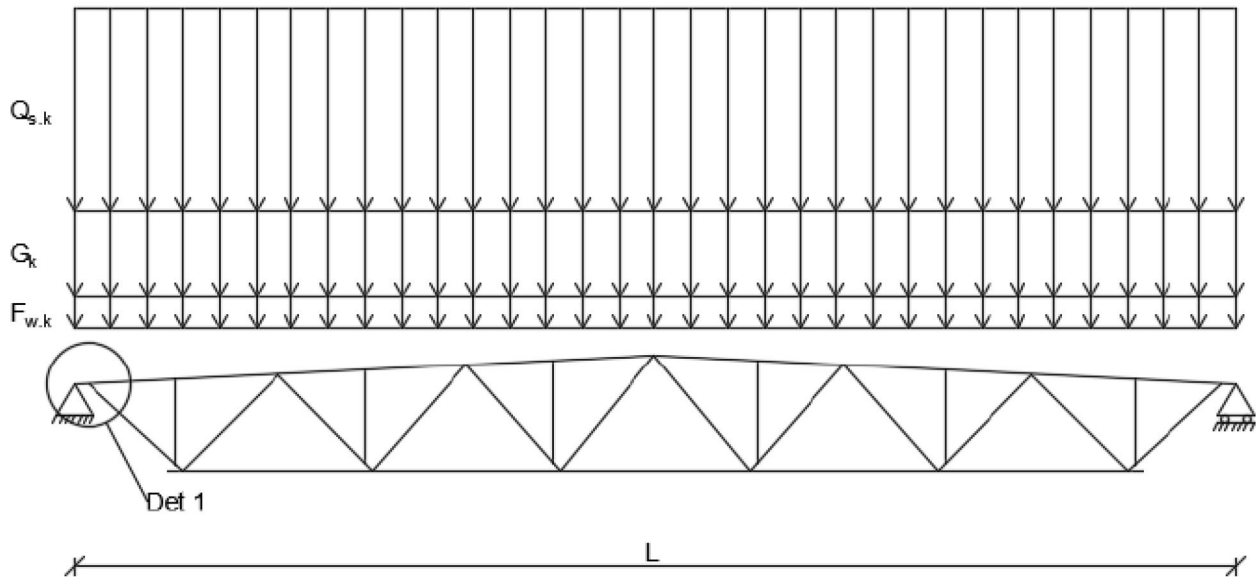
$$KÄYTTÖASTE_{taivutus_ja_leikkaus} = 0.48$$

$$KÄYTTÖASTE_{liitos} = 0.73$$

VAHVISTAMATON YLÄPAARTEEN JA DIAGONAALIN LIITOS KEHÄMALLI 2

LÄHTÖTIEDOT

Ristikön kuormitukset:



Ristikön jänneväli: $L_t := 24000 \text{ mm}$

Ristikön omapaino: $m_t := 2086.8 \text{ kg}$

$$G_{1,k} := \frac{m_t \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{L_t} = \frac{2086.8 \cdot \text{kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{24000 \cdot \text{mm}} = 0.85 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

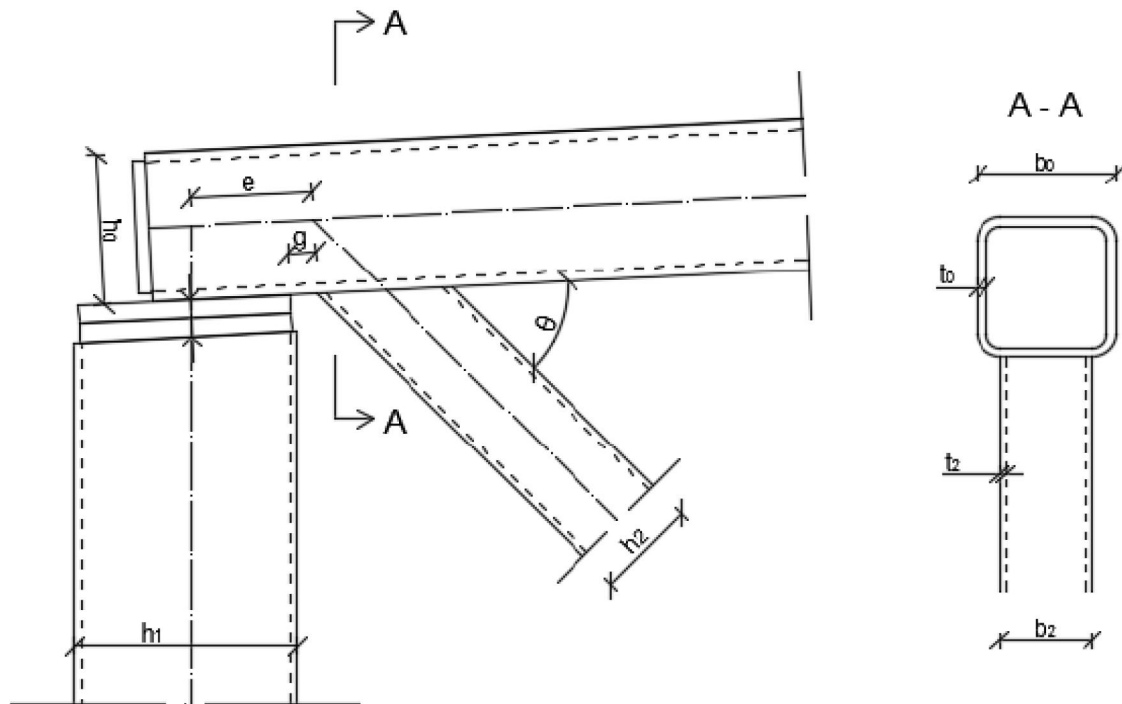
Katon omapaino: $G_{2,k} := 6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Lumikuorma: $Q_{s,k} := 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Tuulikuorma: $F_{w,k} := 2.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Ristikön kokonaiskuorma: $p_{Ed} := 1.15 \cdot G_{1,k} + 1.15 \cdot G_{2,k} + 1.5 \cdot Q_{s,k} + 0.6 \cdot 1.5 \cdot F_{w,k} = 45.77 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Liitoksen rasitukset ja parametrit



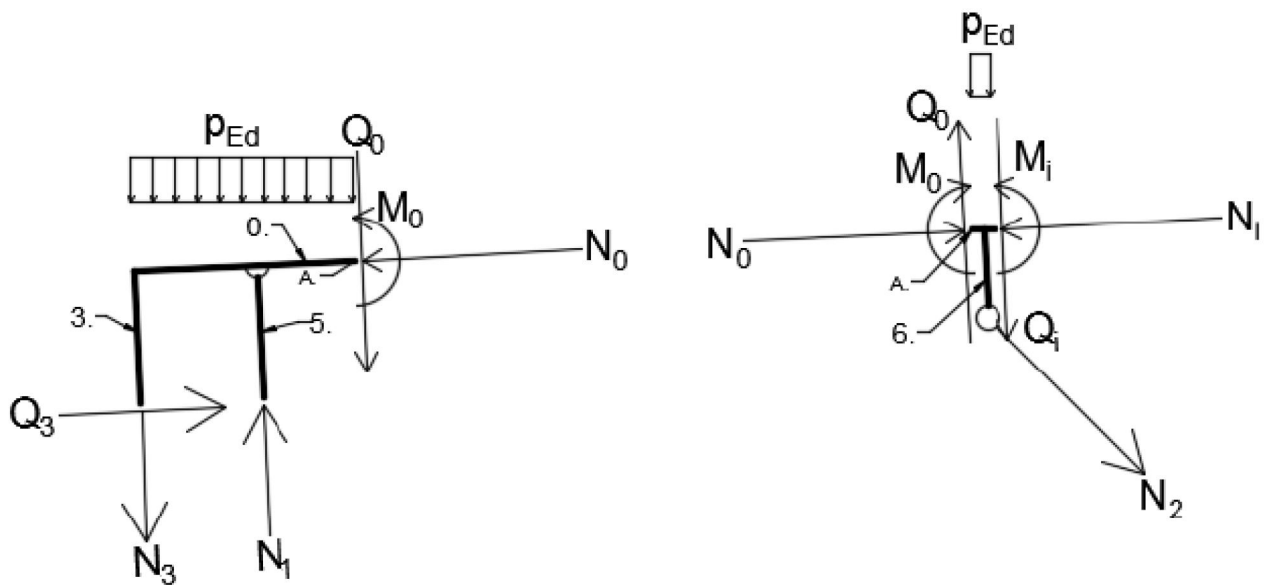
Paarresauva $h_0 := 160\text{mm}$ $b_0 := 160\text{mm}$ $t_0 := 8\text{mm}$ $r_0 := 20\text{mm}$ $A_0 := 4644.25\text{mm}^2$
 $I_0 := 1741.23 \times 10^4 \text{mm}^4$ $W_{el.0} := 217654\text{mm}^3$ $W_{pl.0} := 260140\text{mm}^3$
 myötöraja $f_{y,0} := 550\text{MPa}$ vetomurtolujuus $f_{u,0} := 600\text{MPa}$

Uumasauva $h_2 := 140\text{mm}$ $b_2 := 140\text{mm}$ $t_2 := 7.1\text{mm}$ $r_2 := 17.8\text{mm}$ $A_2 := 3601.27\text{mm}^2$
 $I_2 := 1031.71 \cdot 10^4 \text{mm}^4$ $W_{el.2} := 147387 \cdot 10^3 \text{mm}^3$ $W_{pl.2} := 176320\text{mm}^3$
 myötöraja $f_{y,2} := 420\text{MPa}$ vetomurtolujuus $f_{u,2} := 500\text{MPa}$

Pilari: $h_1 := 250\text{mm}$ $b_1 := 250\text{mm}$ $t_1 := 10\text{mm}$

Materiaalitiedot: $E := 210\text{GPa}$ $\gamma_{M0} := 1.00$ $\gamma_{M1} := 1.00$ $\gamma_{M2} := 1.25$ $\gamma_{M5} := 1.00$

Mitat: Vapaaväli $g := 25\text{mm}$ Uumasauvan kulma $\theta := 33^\circ$
 Epäkeskisyys $e := 135\text{mm}$ Yläpaarteen kulma $\alpha := 1.4^\circ$



Kuva: Vapaakappalekuvat liitoksesta

Paarresauvan normaalivoima	$N_{0.Ed} := 21200\text{N}$	(puristusta)
Pilarin puristusvoima	$N_{1.Ed} := 773100\text{N}$	
Ruuvien vetovoima	$N_{3.Ed} := 220100\text{N}$	
Uumasauvan normaalivoima	$N_{2.Ed} := 499500\text{N}$	(vetoa)
Paarresauvan leikkausvoima	$Q_{0.Ed} := 547600\text{N}$	
Ruuvien leikkausvoima	$Q_{3.Ed} := 21200\text{N}$	
Paarresauvan taivutusmomentti	$M_{0.Ed} := 46.90\text{kN}\cdot\text{m}$	

Rakenneosien rasitukset on määritetty SCIA Engineer 16.1 -ohjelmalla.

Rakenneosien poikkileikkausluokat

Paarresauva: $\epsilon := \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_{y,0}}} = \sqrt{\frac{235 \cdot \text{MPa}}{550 \cdot \text{MPa}}} = 0.65$

PLL1_raja := $33 \cdot \epsilon = 33 \cdot 0.65 = 21.57$
 PLL2_raja := $38 \cdot \epsilon = 38 \cdot 0.65 = 24.84$
 PLL3_raja := $42 \cdot \epsilon = 42 \cdot 0.65 = 27.45$

Huom! Tarkastelu pelkästään puristettuna osana (tulos varmalla puolella)

$c := h_0 - 2 \cdot r_0 = 160 \cdot \text{mm} - 2 \cdot 20 \cdot \text{mm} = 120 \cdot \text{mm}$ $\text{suhde}_{\text{ct}} := \frac{c}{t_0} = \frac{0.12 \cdot \text{m}}{8 \cdot \text{mm}} = 15$

Poikkileikkausluokka $\text{PLL}_0 :=$ $\left\{ \begin{array}{l} 3 \text{ if } \text{suhde}_{\text{ct}} \leq \text{PLL3_raja} \\ 2 \text{ if } \text{suhde}_{\text{ct}} \leq \text{PLL2_raja} \\ 1 \text{ if } \text{suhde}_{\text{ct}} \leq \text{PLL1_raja} \\ 4 \text{ otherwise} \end{array} \right.$

Poikkileikkausluokka $\text{PLL}_0 = 1$

Uumasauva: $\epsilon := \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_{y,2}}} = \sqrt{\frac{235 \cdot \text{MPa}}{f_{y,2}}} = 0.75$

PLL1_raja := $33 \cdot \epsilon = 33 \cdot 0.75 = 24.68$
 PLL2_raja := $38 \cdot \epsilon = 38 \cdot 0.75 = 28.42$
 PLL3_raja := $42 \cdot \epsilon = 42 \cdot 0.75 = 31.42$

Huom! Tarkastelu pelkästään puristettuna osana (tulos varmalla puolella)

$c := h_2 - 2 \cdot r_2 = 140 \cdot \text{mm} - 2 \cdot 17.8 \cdot \text{mm} = 104.4 \cdot \text{mm}$ $\text{suhde}_{\text{ct}} := \frac{c}{t_2} = \frac{0.1044 \cdot \text{m}}{7.1 \cdot \text{mm}} = 14.7042$

Poikkileikkausluokka $\text{PLL}_2 :=$ $\left\{ \begin{array}{l} 3 \text{ if } \text{suhde}_{\text{ct}} \leq \text{PLL3_raja} \\ 2 \text{ if } \text{suhde}_{\text{ct}} \leq \text{PLL2_raja} \\ 1 \text{ if } \text{suhde}_{\text{ct}} \leq \text{PLL1_raja} \\ 4 \text{ otherwise} \end{array} \right.$

Poikkileikkausluokka $\text{PLL}_2 = 1$

Liitoksen mitoitusmuoto (K/N-liitos tai Y-liitos)

Voimassaoloehdot K/N-liitokselle:

Liitos ei voi käyttäytyä K/N-liitoksen tavoin, koska b_1 on suurempi kuin b_0 . Tällöin K-liitoksen myötöviivakuovioita ei pääse syntymään. Liitos mitoitetaan Y-liitoksena.

Voimassaoloehdot Y-liitokselle:

Liitos:

$$30^\circ \leq \theta \leq 90^\circ = 30.^\circ \leq 33.^\circ \leq 90.^\circ$$

Toteutuminen = "OK"

$$t_0 \geq 2.5\text{mm} \rightarrow 8\cdot\text{mm} \geq 2.5\cdot\text{mm}$$

Toteutuminen = "OK"

$$t_1 \geq 2.5\text{mm} \rightarrow 10\cdot\text{mm} \geq 2.5\cdot\text{mm}$$

Toteutuminen = "OK"

$$t_2 \geq 2.5\text{mm} \rightarrow 7.1\cdot\text{mm} \geq 2.5\cdot\text{mm}$$

Toteutuminen = "OK"

Uumasauvat:

$$\frac{b_2}{b_0} = \frac{140\cdot\text{mm}}{160\cdot\text{mm}} = 0.88$$

$$\frac{b_2}{b_0} \geq 0.25$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{b_2}{t_2} = \frac{140\cdot\text{mm}}{7.1\cdot\text{mm}} = 19.72$$

$$\frac{b_2}{t_2} \leq 35$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{h_1}{t_1} = \frac{250\cdot\text{mm}}{10\cdot\text{mm}} = 25$$

$$\frac{h_1}{t_1} \leq 35$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{h_2}{t_2} = \frac{140\cdot\text{mm}}{7.1\cdot\text{mm}} = 19.72$$

$$\frac{h_2}{t_2} \leq 35$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{h_2}{b_2} = \frac{140\cdot\text{mm}}{140\cdot\text{mm}} = 1$$

$$0.5 \leq \frac{h_2}{b_2} \leq 2.0$$

Toteutuminen = "OK"

Paarresauva:

$$\frac{b_0}{t_0} = \frac{160\cdot\text{mm}}{8\cdot\text{mm}} = 20$$

$$\frac{b_0}{t_0} \leq 35$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{h_0}{t_0} = \frac{160\cdot\text{mm}}{8\cdot\text{mm}} = 20$$

$$\frac{h_0}{t_0} \leq 35$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{h_0}{b_0} = \frac{160\cdot\text{mm}}{160\cdot\text{mm}} = 1$$

$$0.5 \leq \frac{h_0}{b_0} \leq 2.0$$

Toteutuminen = "OK"

PAARRESAUVAN JA UUMASAUVAN VÄLINEN LIITOS

Kestävyyskerroin $k_k = 0.8$ Kestävyyskerroin on 0,8, kun teräslaatu on S550 [SFS-EN 1993-1-8]

Paarteen pinnan murtuminen myötäämällä

Paarteen pinnan normaaliännitykseen vaikuttaa paarteen puristusännitys sekä taivutusmomentin aiheuttama taivutusännitys.

Normaalivoima: $N_{0.Ed} = 21200 \cdot \text{N}$ (SCIA Engineer 16.1)

Puristuksesta aiheutuva ännitys: $\sigma_{N,0} := \frac{N_{0.Ed}}{A_0} = \frac{21200 \cdot \text{N}}{4644.25 \cdot \text{mm}^2} = 4.56 \cdot \text{MPa}$

Taivutuksesta aiheutuva ännitys: $\sigma_{M,0} := \frac{M_{0.Ed}}{W_{el,0}} = \frac{46.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}}{217654 \cdot \text{mm}^3} = 215.48 \cdot \text{MPa}$

Paarteen pinnan normaaliännitys: $\sigma := \sigma_{M,0} - \sigma_{N,0} = 2.15 \times 10^8 \cdot \text{Pa} - 4.56 \times 10^6 \cdot \text{Pa} = 210.91 \cdot \text{MPa}$

Paarre on vedetty: $k_n := 1.0$

$$\beta := \frac{b_2}{b_0} = \frac{140 \cdot \text{mm}}{160 \cdot \text{mm}} = 0.88$$

$$\eta := \frac{h_2}{b_0} = \frac{140 \cdot \text{mm}}{160 \cdot \text{mm}} = 0.88$$

$$N_{2.Rd} := k_k \cdot \frac{k_n \cdot f_{y,0} \cdot t_0^2}{(1 - \beta) \cdot \sin(\theta)} \cdot \left(\frac{2 \cdot \eta}{\sin(\theta)} + 4 \cdot \sqrt{1 - \beta} \right) = 0.8 \cdot \frac{1.550 \cdot \text{MPa} \cdot (8 \cdot \text{mm})^2}{(1 - 0.88) \cdot \sin(33^\circ)} \cdot \left(\frac{2 \cdot 0.88}{\sin(33^\circ)} + 4 \cdot \sqrt{1 - 0.88} \right)$$

$N_{2.Rd} = 1914.02 \cdot \text{kN}$ (S550: Kestävyyskerroin 0,8)

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pinnan_murtuminen}} := \frac{N_{2.Ed}}{N_{2.Rd}} = \frac{499500 \cdot \text{N}}{1914019 \cdot \text{N}}$$

$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pinnan_murtuminen}} = 0.26$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen

Tehollinen leveys:

$$b_{e,p} := \frac{10}{\frac{b_0}{t_0}} \cdot b_2 = \frac{10}{\frac{160 \cdot \text{mm}}{8 \cdot \text{mm}}} \cdot 140 \cdot \text{mm} = 70 \cdot \text{mm}$$

$$b_{e,p} := \min(b_{e,p}, b_2) = \min(0.07 \cdot \text{m}, 140 \cdot \text{mm}) = 0.07 \cdot \text{m}$$

$$N_{2,Rd} := k_k \cdot \frac{\frac{f_{y,0} \cdot t_0}{\sqrt{3} \cdot \sin(\theta)} \cdot \left(\frac{2 \cdot h_2}{\sin(\theta)} + 2 \cdot b_{e,p} \right)}{\gamma_{M5}} = 0.8 \cdot \frac{550 \cdot \text{MPa} \cdot 8 \cdot \text{mm} \cdot \left(\frac{2 \cdot 140 \cdot \text{mm}}{\sin(33^\circ)} + 2 \cdot 0.07 \cdot \text{m} \right)}{1}$$

$$N_{2,Rd} = 2440724.31 \cdot \text{N} \quad (\text{S550: Kestävyyskerroin } 0,8)$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{lävistysleikkautuminen}} := \frac{N_{2,Ed}}{N_{2,Rd}} = \frac{499500 \cdot \text{N}}{2440724 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{lävistysleikkautuminen}} = 0.2$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Paarteen uuman lommahtaminen tai myötääminen

Paarteen sivun lommahduslujuus: $f_b := f_{y,0} = 550 \cdot \text{MPa}$ (vedetty paarre)

$$N_{2,Rd} := k_k \cdot \frac{\frac{f_b \cdot t_0}{\sin(\theta)} \cdot \left(\frac{2 \cdot h_2}{\sin(\theta)} + 10 \cdot t_0 \right)}{\gamma_{M5}} = 1 \cdot \frac{6 \times 10^8 \cdot \text{Pa} \cdot 8 \cdot \text{mm} \cdot \left(\frac{2 \cdot 140 \cdot \text{mm}}{\sin(33^\circ)} + 10 \cdot 8 \cdot \text{mm} \right)}{1}$$

$$N_{2,Rd} = 3839678.75 \cdot \text{N} \quad (\text{S550: Kestävyyskerroin } 0,8)$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uuman_myötääminen}} := \frac{N_{2,Ed}}{N_{2,Rd}} = \frac{499500 \cdot \text{N}}{3839679 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uuman_myötääminen}} = 0.13$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Uumasauvan murtuminen myötäämällä

$$\text{Uumasauvan tehollinen leveys } b_{\text{eff}} := \frac{10}{b_0} \cdot \frac{f_{y,0} \cdot t_0}{f_{y,2} \cdot t_2} \cdot b_2 = \frac{10}{\frac{160 \cdot \text{mm}}{8 \cdot \text{mm}}} \cdot \frac{550 \cdot \text{MPa} \cdot 8 \cdot \text{mm}}{420 \cdot \text{MPa} \cdot 7.1 \cdot \text{mm}} \cdot 140 \cdot \text{mm} = 103.29 \cdot \text{mm}$$

$$b_{\text{eff}} := \min(b_{\text{eff}}, b_2) = \min(0.103 \cdot \text{m}, 140 \cdot \text{mm}) = 0.103 \text{ m}$$

$$N_{2,\text{Rd}} := k_k \cdot \frac{f_{y,2} \cdot t_2 \cdot (2 \cdot h_2 - 4 \cdot t_2 + 2 \cdot b_{\text{eff}})}{\gamma_{\text{M5}}} = 0.8 \cdot \frac{420 \cdot \text{MPa} \cdot 7.1 \cdot \text{mm} \cdot (2 \cdot 140 \cdot \text{mm} - 4 \cdot 7.1 \cdot \text{mm} + 2 \cdot 0.103 \cdot \text{m})}{1}$$

$$N_{2,\text{Rd}} = 1093016.96 \cdot \text{N}$$

(S550: Kestävyyskerroin 0,8)

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uumasauvan_murtuminen}} := \frac{N_{2,\text{Ed}}}{N_{2,\text{Rd}}} = \frac{499500 \cdot \text{N}}{1093017 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uumasauvan_murtuminen}} = 0.46$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Liitoksen kestävyys:

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pinnan_murtuminen}} = 0.26$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{lävistysleikkautuminen}} = 0.20$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uuman_myötääminen}} = 0.13$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uumasauvan_murtuminen}} = 0.46$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{liitos}} = 0.46$$

YLÄPAARTEEN KESTÄVYYS TUELLA

Yläpaarteen päätä rasittavat voimat

Leikkausvoima $Q_{0.Ed} = 547.6 \cdot \text{kN}$

Taivutusmomentti $M_{0.Ed} = 46.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

Normaalivoima $N_{0.Ed} = 21.2 \cdot \text{kN}$

Taivutuskestävyys

Taivutuskestävyyden mitoitusarvo:
$$M_{pl.Rd} := \frac{W_{pl.0} \cdot f_{y.0}}{\gamma_{M0}} = \frac{2.6 \times 10^5 \cdot \text{mm}^3 \cdot 550 \cdot \text{MPa}}{1}$$

$$M_{pl.Rd} = 143.08 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus}} := \frac{M_{0.Ed}}{M_{pl.Rd}} = \frac{47 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}}{143077 \cdot \text{N} \cdot \text{m}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus}} = 0.33$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Puristuskestävyys

Puristuskestävyyden mitoitusarvo:
$$N_{c.Rd} := \frac{A_0 \cdot f_{y.0}}{\gamma_{M0}} = \frac{4644.25 \cdot \text{mm}^2 \cdot 550 \cdot \text{MPa}}{1}$$

$$N_{c.Rd} = 2554.34 \cdot \text{kN}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{puristus}} := \frac{N_{0.Ed}}{N_{c.Rd}} = \frac{21200 \cdot \text{N}}{2554338 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{puristus}} = 0.01$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Taivutuksen ja normaaliveiman yhteisvaikutus

$$N_{0.25.Rd} := 0.25 \cdot N_{c.Rd} = 0.25 \cdot 2.55 \times 10^6 \cdot N = 638.58 \cdot kN$$

$$N_{0.Ed} \leq N_{0.25.Rd} = 21200.00 \cdot N \leq 638584.38 \cdot N$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

$$N_{0.5.Rd} := \frac{0.5 \cdot h_0 \cdot t_0 \cdot f_{y.0}}{\gamma_{M0}} = \frac{0.5 \cdot 160 \cdot mm \cdot 8 \cdot mm \cdot 550 \cdot MPa}{1} = 352 \cdot kN$$

$$N_{0.Ed} \leq N_{0.5.Rd} = 21200 \cdot N \leq 352000 \cdot N$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Taivutusmomentin ja normaaliveiman yhteisvaikutus: YHTEISVAIKUTUS = "EI TARVITSE TUTKIA!"



Leikkauskestävyys

Leikkauspinta-ala:
$$A_v := \frac{A_0 \cdot h_0}{b_0 + h_0} = \frac{4644.25 \cdot \text{mm}^2 \cdot 160 \cdot \text{mm}}{160 \cdot \text{mm} + 160 \cdot \text{mm}} = 2322.13 \cdot \text{mm}^2$$

Leikkauskestävyyden mitoitusarvo:
$$V_{pl.Rd} := \frac{A_v \cdot \left(\frac{f_{y,0}}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} = \frac{0.00232 \cdot \text{m}^2 \cdot \frac{550 \cdot \text{MPa}}{\sqrt{3}}}{1}$$

$$V_{pl.Rd} = 737.37 \cdot \text{kN}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{leikkaus}} := \frac{Q_{0.Ed}}{V_{pl.Rd}} = \frac{547600 \cdot \text{N}}{737374 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{leikkaus}} = 0.74$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Taivutusmomentin ja leikkausvoiman yhteisvaikutus: YHTEISVAIKUTUS = "TUTKITTAVA!"

Taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutus

Taivutusvastuksen pienennystekijä:
$$\rho := \left(\frac{2 \cdot Q_{0.Ed}}{V_{pl.Rd}} - 1 \right)^2 = \left(\frac{2 \cdot 547600 \cdot \text{N}}{737373.72 \cdot \text{N}} - 1 \right)^2 = 0.24$$

Taivutusmomentin ja leikkauskestävyyden yhteisvaikutuksen mitoitusarvo:

$$M_{v.Rd} := \left(W_{pl,0} - \frac{\rho \cdot A_v^2}{8 \cdot t_0} \right) \left(\frac{f_{y,0}}{\gamma_{M0}} \right) = \left[2.6014 \times 10^5 \cdot \text{mm}^3 - \frac{0.23549 \cdot (0.00232 \cdot \text{m}^2)^2}{8 \cdot 8 \cdot \text{mm}} \right] \cdot \frac{550 \cdot \text{MPa}}{1}$$

$$M_{v.Rd} = 132.16 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus_ja_leikkaus}} := \frac{M_{0.Ed}}{M_{v.Rd}} = \frac{46.90 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}}{132164.53 \cdot \text{N} \cdot \text{m}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus_ja_leikkaus}} = 0.35$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Liitoksen kestävyys

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{puristus}} = 0.01$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus}} = 0.33$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{leikkaus}} = 0.74$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus_ja_puristus}} = 0.26$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus_ja_leikkaus}} = 0.35$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{liitos}} = 0.74$$

YLÄPAARTEEN PÄÄN KESTÄVYYS PISTEVOIMALLE

Jotta saadaan varmalla puolella oleva yksinkertaistus, oletetaan pistekuorman siirtyvän ainoastaan pilarin sisäreunan kautta (paarteen taipuman johdosta). Kuorman voidaan olettaa siirtyvän liitoslevyjen läpi 45 asteen kulmassa (katso yllä oleva kuva).

Liitoslevyjen paksuudet: $t_p := 20\text{mm}$

Kuorman vaikutuspituus: $s_s := 2 \cdot t_p = 40 \cdot \text{mm}$

Puristusrasitus paarteelle: $N_{1,Ed} = 773.1 \cdot \text{kN}$

Tekijän C_F määrittäminen

Määritetään kuormitustapauksen mukainen tekijä C_F . Koska putken pää on jäykistetty levyllä, voidaan pistekuormaa pitää "kaukana sijaitsevana kuormana palkin päästä".

Kuorman vaikutuspituuden ja leveyden suhde: $\frac{s_s}{t_0} = 5$ (suhteen perusteella valitaan tekijän C_F laskentakaava)

Tekijän C_F laskennassa käytettävät termit:

Putken nurkan sisäsäde: $r_{0i} := r_0 - t_0 = 20 \cdot \text{mm} - 8 \cdot \text{mm} = 12 \cdot \text{mm}$

Aputermi: $k := \frac{f_{y,0}}{228\text{MPa}} = \frac{550 \cdot \text{MPa}}{228 \cdot \text{MPa}} = 2.41$

Termi: $k_1 := 1.33 - 0.33 \cdot k = 1.33 - 0.33 \cdot 2.41 = 0.53$

Termi: $k_2 := 1.15 - 0.15 \cdot \frac{r_{0i}}{t_0} = 1.15 - 0.15 \cdot \frac{0.012 \cdot \text{m}}{8 \cdot \text{mm}} = 0.925$

$$\text{Alaraja}_{k_2} := k_2 \geq 0.5 = 0.93 \geq 0.5$$

$$\text{Yläraja}_{k_2} := k_2 \leq 1.0 = 0.93 \leq 1$$

Termi: $k_3 := 1.0$

Termi: $k_4 := 1.22 - 0.22 \cdot k = 1.22 - 0.22 \cdot 2.41 = 0.69$

Termi: $k_5 := 1.06 - 0.06 \cdot \frac{r_{0i}}{t_0} = 0.97$

$$\text{Yläraja}_{k_5} := k_5 \leq 1.0 = 0.97 \leq 1$$

$$C_F := k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot \left[14.7 - \left(\frac{h_0 - t_0}{49.5} \right) \right] \cdot \left(1 + 0.007 \cdot \frac{s_s}{t_0} \right) = 1 \cdot 0.69 \cdot 0.97 \cdot \left(14.7 - \frac{160 \cdot \text{mm} - 8 \cdot \text{mm}}{49.5} \right) \cdot \left(1 + 0.01 \cdot \frac{0.04 \cdot \text{m}}{8 \cdot \text{mm}} \right)$$

$$C_F = 9.91$$

Yhden uuman pistekuormakestävyys:

$$F_{w,Rd} := C_F \cdot \frac{t_0^2 \cdot f_{y,0}}{\gamma_{M1}} = 9.91 \cdot \frac{(8 \cdot \text{mm})^2 \cdot 550 \cdot \text{MPa}}{1}$$

$$F_{w,Rd} = 348729.36 \cdot \text{N}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pistekuorma}} := \frac{0.5 \cdot N_{1,Ed}}{F_{w,Rd}} = \frac{0.5 \cdot 773100 \cdot \text{N}}{348729.4 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pistekuorma}} = 1.11$$

KÄYTTÖASTE = "EI KESTÄ!"



YLÄPAARTEEN VAHVISTETUN PÄÄN KESTÄVYYS PISTEVOIMALLE

Vahvistetaan yläpaarteen kylkiä 5 mm vahvoilla levyillä. $t_v := 5\text{mm}$

Liitoslevyjen paksuudet: $t_p := 20\text{mm}$

Kuorman vaikutuspituus: $s_s := 2 \cdot t_p = 40 \cdot \text{mm}$

Puristusrasitus paarteelle: $N_{1,Ed} = 773.1 \cdot \text{kN}$

Tekijän C_F määrittäminen

Määritetään kuormitustapauksen mukainen tekijä C_F . Koska putken pää on jäykistetty levyllä, voidaan pistekuormaa pitää "kaukana sijaitsevana kuormana palkin päästä".

Kuorman vaikutuspituuden ja leveyden suhde: $\frac{s_s}{t_0 + t_v} = 3.08$ (suhteen perusteella valitaan tekijän C_F laskentakaava)

Tekijän C_F laskennassa käytettävät termit:

Putken nurkan sisäsäde: $r_{0i} := r_0 - t_0 = 20 \cdot \text{mm} - 8 \cdot \text{mm} = 12 \cdot \text{mm}$

Aputermi: $k := \frac{f_{y,0}}{228\text{MPa}} = \frac{550 \cdot \text{MPa}}{228 \cdot \text{MPa}} = 2.41$

Termi: $k_1 := 1.33 - 0.33 \cdot k = 1.33 - 0.33 \cdot 2.41 = 0.53$

Termi: $k_2 := 1.15 - 0.15 \cdot \frac{r_{0i}}{t_0} = 1.15 - 0.15 \cdot \frac{0.012 \cdot \text{m}}{8 \cdot \text{mm}} = 0.925$

$$\text{Alaraja}_{k2} := k_2 \geq 0.5 = 0.93 \geq 0.5$$

$$\text{Yläaraja}_{k2} := k_2 \leq 1.0 = 0.93 \leq 1$$

Termi: $k_3 := 1.0$

Termi: $k_4 := 1.22 - 0.22 \cdot k = 1.22 - 0.22 \cdot 2.41 = 0.69$

Termi: $k_5 := 1.06 - 0.06 \cdot \frac{r_{0i}}{t_0} = 0.97$

$$\text{Yläaraja}_{k5} := k_5 \leq 1.0 = 0.97 \leq 1$$

$$C_F := k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot \left[14.7 - \left(\frac{h_0 - t_0}{t_0 + t_v} \right) \right] \cdot \left(1 + 0.007 \cdot \frac{s_s}{t_0 + t_v} \right) = 1 \cdot 0.69 \cdot 0.97 \cdot \left(14.7 - \frac{160 \cdot \text{mm} - 8 \cdot \text{mm}}{8 \cdot \text{mm} + 5 \cdot \text{mm}} \right) \cdot \left(1 + 0.01 \cdot \frac{0.04 \cdot \text{m}}{8 \cdot \text{mm} + 5 \cdot \text{mm}} \right)$$

$$C_F = 9.88$$

Yhden uuman pistekuormakestävyys:

$$F_{w,Rd} := C_F \cdot \frac{\left[(t_0 + t_v)^2 \right] \cdot f_{y,0}}{\gamma_{M1}} = 9.88 \cdot \frac{(8 \cdot \text{mm} + 5 \cdot \text{mm})^2 \cdot 550 \cdot \text{MPa}}{1}$$

$$F_{w,Rd} = 918258.98 \cdot \text{N}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pistekuorma}} := \frac{0.5 \cdot N_{1,Ed}}{F_{w,Rd}} = \frac{0.5 \cdot 773100 \cdot \text{N}}{918259 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pistekuorma}} = 0.42$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"



Liitoksen kestävyys

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{puristus}} = 0.01$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus}} = 0.33$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{leikkaus}} = 0.74$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pistekuorma}} = 0.42$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{liitos}} = 0.74$$

Käyttöaste vahvistamattomana oli 1,11. Käytetty menetelmä on kehitetty eri tilanteisiin, jossa sitä nyt käytettiin. Koska paarteen murtumista ei kokeissa havaittu, menetelmä on selvästi varmalla puolella.

RUUVILIITOKSEN KESTÄVYYS

Leikkausrasitus ruuveille: $Q_{3.Ed} = 21.2 \cdot \text{kN}$

Ruuvien ja levyjen parametrit

Ruuvit

Halkaisija

$$d := 30 \text{ mm}$$

Poikkileikkausala

$$A := \pi \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{30 \cdot \text{mm}}{2} \right)^2 = 706.86 \cdot \text{mm}^2$$

Myötöraja

$$f_{yb} := 640 \text{ MPa}$$

Murtoraja

$$f_{ub} := 800 \text{ MPa}$$

Levyt

Paksuus

$$t_p = 20 \cdot \text{mm}$$

Myötöraja

$$f_y := 355 \text{ MPa}$$

Murtolujuus

$$f_u := 500 \text{ MPa}$$

Ruuvien reiän koko:

$$d_0 := 33 \text{ mm}$$

Reunaetäisyyden minimiarvo:

$$\min_{e1} := 1.2 \cdot d_0 = 1.2 \cdot 33 \cdot \text{mm} = 39.6 \cdot \text{mm}$$

Reunaetäisyyden minimiarvo:

$$\min_{e2} := 1.2 \cdot d_0 = 1.2 \cdot 33 \cdot \text{mm} = 39.6 \cdot \text{mm}$$

Reunaetäisyys

$$e_1 := 85 \text{ mm} \quad e_1 \geq \min_{e1} = 85 \cdot \text{mm} \geq 0.04 \cdot \text{m}$$

Reunaetäisyys

$$e_2 := 50 \text{ mm} \quad e_2 \geq \min_{e2} = 50 \cdot \text{mm} \geq 0.04 \cdot \text{m}$$

Leikkauskestävyys

Ruuvien lujuusluokasta riippuva kerroin: $\alpha_v := 0.6$

Ruuvien jännityspoikkipinta-ala: $A_s = 561 \cdot \text{mm}^2$

(Ruuvien kierteet ovat leikkaustasossa)

Leikkauslujuus leikettä kohti:
$$F_{v.Rd} := \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0.6 \cdot 800 \cdot \text{MPa} \cdot 0.000561 \cdot \text{m}^2}{1.25}$$

$$F_{v.Rd} = 215424 \cdot \text{N}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_leikkauskestävyys}} := \frac{0.5 \cdot Q_{3.Ed}}{F_{v.Rd}} = \frac{0.5 \cdot 21200 \cdot \text{N}}{215424 \cdot \text{N}}$$

(Leikkausvoima vaikuttaa kahteen ruuviin)

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_leikkauskestävyys}} = 0.05$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Reunapuristuskestävyys

Voiman suunnasta riippuva tekijä: $a_d := \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{85 \cdot \text{mm}}{3 \cdot 33 \cdot \text{mm}} = 0.86$

$$\text{suhde}_f := \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800 \cdot \text{MPa}}{500 \cdot \text{MPa}} = 1.6$$

$$a_b := \min(a_d, \text{suhde}_f, 1.0) = \min(0.86, 1.6, 1) = 0.86$$

Voiman suunnasta riippuva tekijä: $\text{suhde}_{ed} := 2.8 \cdot \frac{e_2}{d_0} = 2.8 \cdot \frac{50 \cdot \text{mm}}{33 \cdot \text{mm}} = 4.24$

$$k_1 := \min(\text{suhde}_{ed}, 2.5) = \min(4.24, 2.5) = 2.5$$

Reunapuristuslujuus: $F_{b,Rd} := \frac{k_1 \cdot a_b \cdot f_u \cdot d \cdot t_p}{\gamma_{M2}} = \frac{2.5 \cdot 0.86 \cdot 500 \cdot \text{MPa} \cdot 30 \cdot \text{mm} \cdot 0.02 \cdot \text{m}}{1.25}$

$$F_{b,Rd} = 515151.52 \cdot \text{N}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{reunapuristuskestävyys}} := \frac{0.5 \cdot Q_{3,Ed}}{F_{b,Rd}} = \frac{0.5 \cdot 21200 \cdot \text{N}}{515151.5 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{reunapuristuskestävyys}} = 0.02$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Ruuvien vetorasitus

Ruuveille tulee vapaakappalekuvan mukaisesti vetorasitusta voiman $N_{3,Ed}$ suuruuden verran. Voima jakautuu kahdelle ruuville.

Vetorasitus kahdelle ruuville: $N_{3,Ed} = 220.1 \cdot \text{kN}$

Pienennyskerroin $k_2 := 0.9$ (ruuvi ei ole uppokantainen)

Ruuvin jännityspoikkipinta-ala: $A_s = 561 \cdot \text{mm}^2$

Vetokestävyys: $F_{t,Rd} := \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \cdot 800 \cdot \text{MPa} \cdot 0.000561 \cdot \text{m}^2}{1.25}$

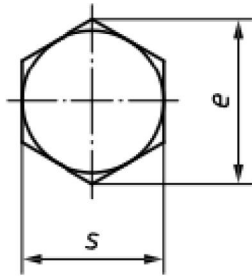
$$F_{t,Rd} = 323136 \cdot \text{N}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvin_vetokestävyys}} := \frac{0.5 \cdot N_{3,Ed}}{F_{t,Rd}} = \frac{0.5 \cdot 220100 \cdot \text{N}}{323136 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvin_vetokestävyys}} = 0.34$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Ruuvien ja mutterin lävistymiskestävyys



[SFS-EN ISO 4014]

Ruuvien halkaisija: $d = 30 \cdot \text{mm}$

Avainmitta: $s = 46 \cdot \text{mm}$

Mitta: $e = 50.85 \cdot \text{mm}$

Mitat s ja e löytyvät standardista SFS-EN ISO 4014

Ruuvien kannan etäisimpien pisteiden ja avainvälin keskiarvo: $d_m := \frac{s + e}{2} = \frac{0.05 \cdot m + 0.05 \cdot m}{2}$
 $d_m = 48.42 \cdot \text{mm}$

Kiinnityslevyn paksuus: $t_p = 20 \cdot \text{mm}$

Lävistymiskestävyys: $B_{p,Rd} := \frac{0.6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0.6 \cdot \pi \cdot 0.048 \cdot m \cdot 0.02 \cdot m \cdot 500 \cdot \text{MPa}}{1.25}$
 $B_{p,Rd} = 730231.8 \cdot \text{N}$

KÄYTTÖASTE_{ruuvien_lävistymiskestävyys} := $\frac{0.5 \cdot N_{3,Ed}}{B_{p,Rd}} = \frac{0.5 \cdot 220100 \cdot \text{N}}{730231.8 \cdot \text{N}}$

KÄYTTÖASTE_{ruuvien_lävistymiskestävyys} = 0.15

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Yhdistetty leikkaus ja vetovoima

KÄYTTÖASTE_{leikkaus_ja_veto} := $\frac{0.5 \cdot Q_{3,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{0.5 \cdot N_{3,Ed}}{1.4 \cdot F_{t,Rd}} = \frac{0.5 \cdot 21200 \cdot \text{N}}{215424 \cdot \text{N}} + \frac{0.5 \cdot 220100 \cdot \text{N}}{1.4 \cdot 323136 \cdot \text{N}}$

KÄYTTÖASTE_{leikkaus_ja_veto} = 0.29

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Liitoksen kestävyys

KÄYTTÖASTE_{ruuvien_leikkauskestävyys} = 0.05

KÄYTTÖASTE_{reunapuristuskestävyys} = 0.02

KÄYTTÖASTE_{ruuvien_vetokestävyys} = 0.34

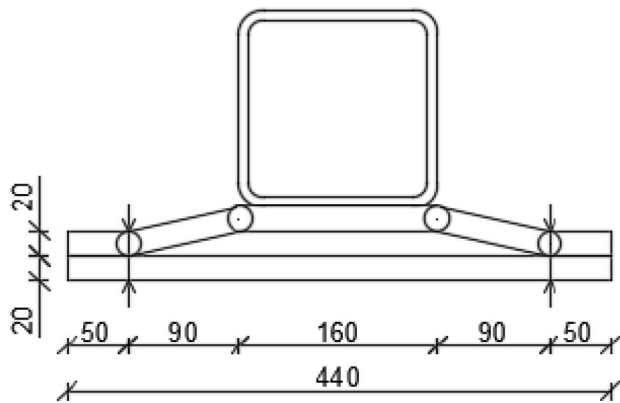
KÄYTTÖASTE_{ruuvien_lävistymiskestävyys} = 0.15

KÄYTTÖASTE_{leikkaus_ja_veto} = 0.29

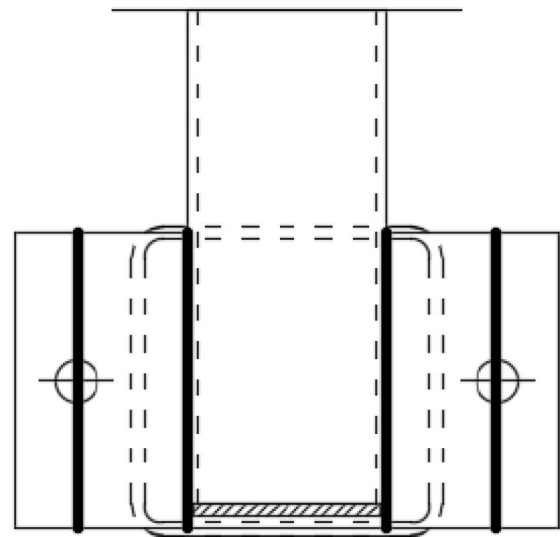
KÄYTTÖASTE_{liitos} = 0.34

LIITOSLEVYN TANUTUSKESTÄVYYS

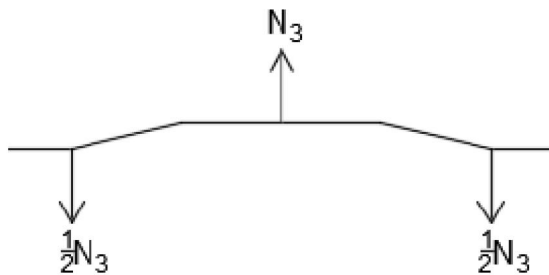
Murtumismuoto ja oletetut myötöviivat



Kuva: Murtumismuodon 1 mukainen murtuminen



Kuva: Oletetut myötöviivat



Kuva: Vapaakappalekuva

Levyn parametrit

Paksuus	$t_p := 20\text{mm}$	
Pituus	$h_p := 170\text{mm}$	
Myötöraja	$f_y := 355\text{MPa}$	
Ruuvien reiän koko:	$d_0 := 33\text{mm}$	
Reunaetäisyyden minimiarvo:	$\min_{e1} := 1.2 \cdot d_0 = 1.2 \cdot 33 \cdot \text{mm} = 39.6 \cdot \text{mm}$	
Reunaetäisyyden minimiarvo:	$\min_{e2} := 1.2 \cdot d_0 = 1.2 \cdot 33 \cdot \text{mm} = 39.6 \cdot \text{mm}$	
Reunaetäisyys	$e_1 := 85\text{mm}$	$e_1 \geq \min_{e1} = 85 \cdot \text{mm} \geq 0.04 \cdot m$
Reunaetäisyys	$e_2 := 50\text{mm}$	$e_2 \geq \min_{e2} = 50 \cdot \text{mm} \geq 0.04 \cdot m$
Ruuvien etäisyys laipan ulkopinnasta	$n := 50\text{mm}$	$n \leq \max_n$
Ruuvien etäisyys paarteen pinnasta	$m := 90\text{mm}$	$\max_n := 1.25 \cdot m = 1.25 \cdot 90 \cdot \text{mm} = 112.5 \cdot \text{mm}$

Murtumismalli 1: Täyden mekanismin syntyminen laipassa

Ekvivalentin T-osan laipan tehollinen pituus $l_{\text{eff}} := h_p = 170 \cdot \text{mm}$

Plastinen taivutusmomentti:
$$M_{\text{pl.1.Rd}} := \frac{l_{\text{eff}} \cdot t_p^2 \cdot f_y}{4 \cdot \gamma_{M0}} = \frac{0.17 \cdot \text{m} \cdot (0.02 \cdot \text{m})^2 \cdot 355 \cdot \text{MPa}}{4 \cdot 1}$$

$$M_{\text{pl.1.Rd}} = 6.04 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Kestävyyden mitoitusarvo
$$F_{\text{T.1.Rd}} := \frac{4 \cdot M_{\text{pl.1.Rd}}}{m} = \frac{4 \cdot 6035 \cdot \text{N} \cdot \text{m}}{90 \cdot \text{mm}}$$

$$F_{\text{T.1.Rd}} = 268.22 \cdot \text{kN}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{laipan_myötääminen}} := \frac{N_{3.Ed}}{F_{\text{T.1.Rd}}} = \frac{220100 \cdot \text{N}}{268222.222222222 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{laipan_myötääminen}} = 0.82$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Murtumismalli 2: Ruuvien murtuminen, kun laippa samalla myötää

Ekvivalentin T-osan laipan tehollinen pituus $l_{\text{eff}} := h_p = 170 \cdot \text{mm} = 170 \cdot \text{mm}$

Plastinen taivutusmomentti:
$$M_{\text{pl.2.Rd}} := M_{\text{pl.1.Rd}} = 6035 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

Ruuvien vetokestävyyden mitoitusarvo
$$F_{\text{t.Rd}} := \frac{0.9 \cdot f_{\text{ub}} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \cdot 800 \cdot \text{MPa} \cdot 0.000561 \cdot \text{m}^2}{1.25}$$

$$F_{\text{t.Rd}} = 323.14 \cdot \text{kN}$$

Ruuvien vetokestävyyksien summa
$$\Sigma F_{\text{t.Rd}} := 2 \cdot F_{\text{t.Rd}} = 646.27 \cdot \text{kN}$$

Kestävyyden mitoitusarvo
$$F_{\text{T.2.Rd}} := \frac{2 \cdot M_{\text{pl.2.Rd}} + n \cdot \Sigma F_{\text{t.Rd}}}{m + n} = \frac{2 \cdot 6035 \cdot \text{N} \cdot \text{m} + 50 \cdot \text{mm} \cdot 646272 \cdot \text{N}}{90 \cdot \text{mm} + 50 \cdot \text{mm}}$$

$$F_{\text{T.2.Rd}} = 317.03 \cdot \text{kN}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_murtuminen_1}} := \frac{N_{3.Ed}}{F_{\text{T.2.Rd}}} = \frac{220100 \cdot \text{N}}{317026 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_murtuminen_1}} = 0.69$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Murtumismalli 3: Ruuvien murtuminen

Ekvivalentin T-osan laipan tehollinen pituus $l_{\text{eff}} := h_p = 170 \cdot \text{mm} = 170 \cdot \text{mm}$

Ruuvien vetokestävyyden mitoitusarvo $F_{t,Rd} := \frac{0.9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \cdot 800 \cdot \text{MPa} \cdot 0.000561 \cdot \text{m}^2}{1.25}$

$$F_{t,Rd} = 323.14 \cdot \text{kN}$$

Ruuvien vetokestävyyksien summa $\Sigma F_{t,Rd} := 2 \cdot F_{t,Rd} = 646.27 \cdot \text{kN}$

Kestävyyden mitoitusarvo $F_{T.3,Rd} := \Sigma F_{t,Rd} = 646.27 \cdot \text{kN}$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_murtuminen_2}} := \frac{N_{3,Ed}}{F_{T.3,Rd}} = \frac{220100 \cdot \text{N}}{646272 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_murtuminen_2}} = 0.34$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Liitoslevyn kestävyys

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{laipan_myötääminen}} = 0.82$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_murtuminen_1}} = 0.69$$

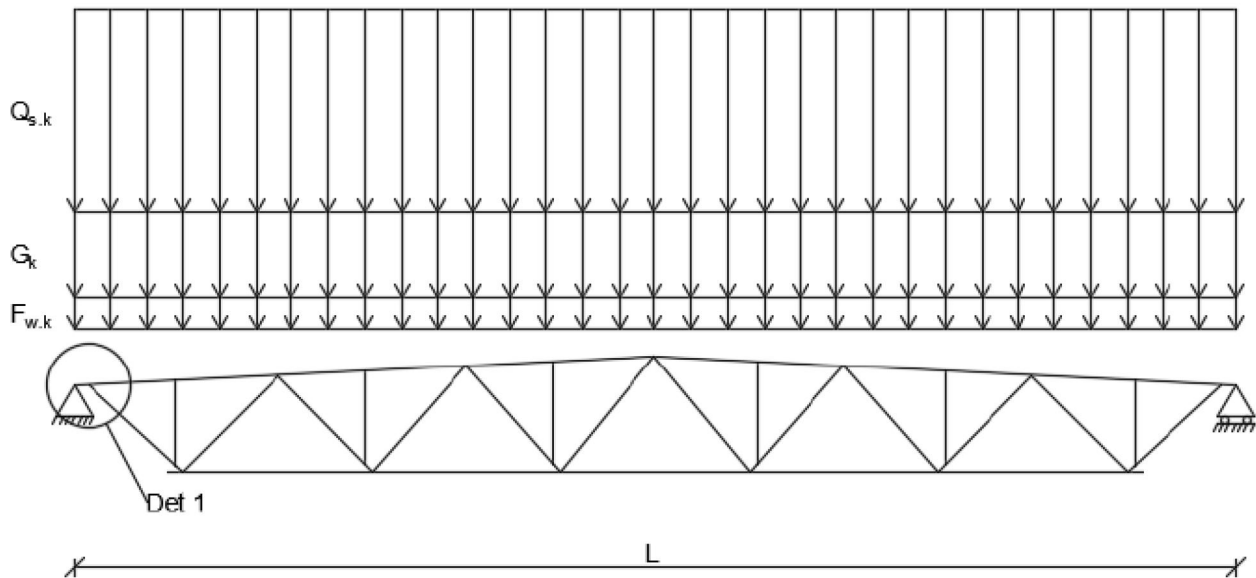
$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_murtuminen_2}} = 0.34$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{liitoslevy}} = 0.82$$

VAHVISTETTU YLÄPAARTEEN JA DIAGONAALIN LIITOS KEHÄMALLI 2

LÄHTÖTIEDOT

Ristikön kuormitukset:



Ristikön jänneväli: $L_t := 24000 \text{ mm}$

Ristikön omapaino: $m_t := 1312.2 \text{ kg}$

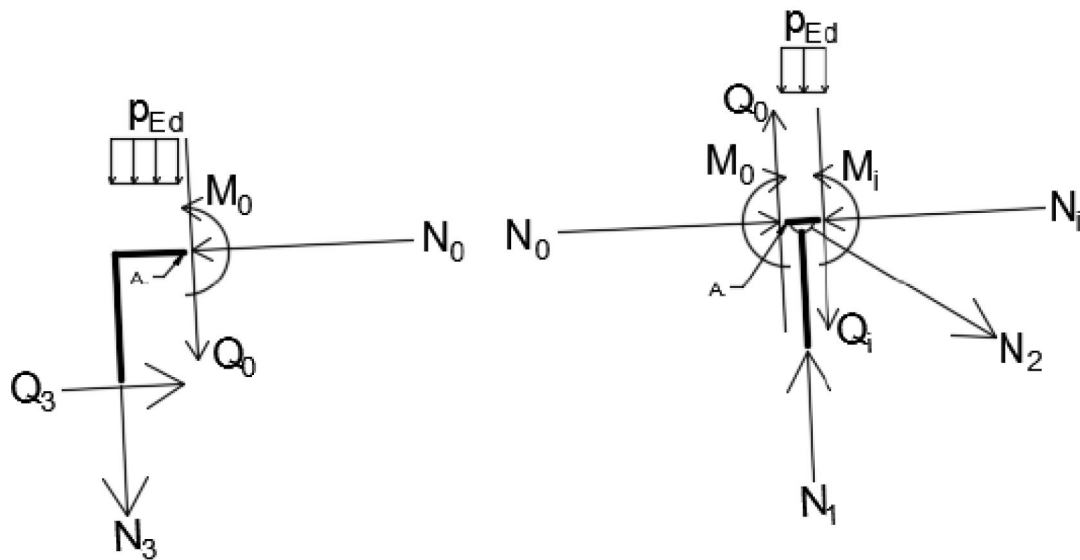
$$G_{1,k} := \frac{m_t \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{L_t} = \frac{1312.2 \cdot \text{kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{24000 \cdot \text{mm}} = 0.54 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Katon omapaino: $G_{2,k} := 6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Lumikuorma: $Q_{s,k} := 14 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Tuulikuorma: $F_{w,k} := 2.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Ristikön kokonaiskuorma: $p_{Ed} := 1.15 \cdot G_{1,k} + 1.15 \cdot G_{2,k} + 1.5 \cdot Q_{s,k} + 0.6 \cdot 1.5 \cdot F_{w,k} = 30.41 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$



Kuva: Vapaakappalekuvat liitoksesta

Paarresauvan normaalivoima	$N_{0.Ed} := 9500\text{N}$	(puristusta)
Pilarin puristusvoima	$N_{1.Ed} := 666700\text{N}$	
Ruuvien vetovoima	$N_{3.Ed} := 300500\text{N}$	
Uumasauvan normaalivoima	$N_{2.Ed} := 605300\text{N}$	(vetoa)
Paarresauvan leikkausvoima	$Q_{0.Ed} := 301900\text{N}$	
Ruuvien leikkausvoima	$Q_{3.Ed} := 9500\text{N}$	
Paarresauvan taivutusmomentti	$M_{0.Ed} := 15.50\text{kN}\cdot\text{m}$	

Rakenneosien rasitukset on määritetty SCIA Engineer 16.1 -ohjelmalla.

Rakenneosien poikkileikkausluokat

Paarresauva:

$$\epsilon := \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_{y,0}}} = \sqrt{\frac{235 \cdot \text{MPa}}{550 \cdot \text{MPa}}} = 0.65$$

$$\text{PLL1_raja} := 33 \cdot \epsilon = 33 \cdot 0.65 = 21.57$$

$$\text{PLL2_raja} := 38 \cdot \epsilon = 38 \cdot 0.65 = 24.84$$

$$\text{PLL3_raja} := 42 \cdot \epsilon = 42 \cdot 0.65 = 27.45$$

Huom! Tarkastelu pelkästään puristettuna osana (tulos varmalla puolella)

$$c := h_0 - 2 \cdot r_0 = 140 \cdot \text{mm} - 2 \cdot 12 \cdot \text{mm} = 116 \cdot \text{mm}$$

$$\text{suhde}_{\text{ct}} := \frac{c}{t_0} = \frac{0.12 \cdot \text{m}}{6 \cdot \text{mm}} = 19.33$$

Poikkileikkausluokka $\text{PLL}_0 :=$

3	if $\text{suhde}_{\text{ct}} \leq \text{PLL3_raja}$
2	if $\text{suhde}_{\text{ct}} \leq \text{PLL2_raja}$
1	if $\text{suhde}_{\text{ct}} \leq \text{PLL1_raja}$
4	otherwise

Poikkileikkausluokka $\text{PLL}_0 = 1$

Uumasauva:

$$\epsilon := \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_{y,2}}} = \sqrt{\frac{235 \cdot \text{MPa}}{f_{y,2}}} = 0.75$$

$$\text{PLL1_raja} := 33 \cdot \epsilon = 33 \cdot 0.75 = 24.68$$

$$\text{PLL2_raja} := 38 \cdot \epsilon = 38 \cdot 0.75 = 28.42$$

$$\text{PLL3_raja} := 42 \cdot \epsilon = 42 \cdot 0.75 = 31.42$$

Huom! Tarkastelu pelkästään puristettuna osana (tulos varmalla puolella)

$$c := h_2 - 2 \cdot r_2 = 100 \cdot \text{mm} - 2 \cdot 10 \cdot \text{mm} = 80 \cdot \text{mm}$$

$$\text{suhde}_{\text{ct}} := \frac{c}{t_2} = \frac{0.08 \cdot \text{m}}{5.00 \cdot \text{mm}} = 16.00$$

Poikkileikkausluokka $\text{PLL}_2 :=$

3	if $\text{suhde}_{\text{ct}} \leq \text{PLL3_raja}$
2	if $\text{suhde}_{\text{ct}} \leq \text{PLL2_raja}$
1	if $\text{suhde}_{\text{ct}} \leq \text{PLL1_raja}$
4	otherwise

Poikkileikkausluokka $\text{PLL}_2 = 1$

Liitoksen mitoitusmuoto (K/N-liitos tai Y-liitos)

Voimassaoloehdot K/N-liitokselle:

Liitos ei voi käyttäytyä K/N-liitoksen tavoin, koska b_1 on suurempi kuin b_0 . Tällöin K-liitoksen myötöviivakuovioita ei pääse syntymään. Liitos mitoitetaan Y-liitoksena.

Voimassaoloehdot Y-liitokselle:

Liitos:

$$30^\circ \leq \theta \leq 90^\circ = 30.^\circ \leq 33.^\circ \leq 90.^\circ$$

Toteutuminen = "OK"

$$t_0 \geq 2.5\text{mm} \rightarrow 6\cdot\text{mm} \geq 2.5\cdot\text{mm}$$

Toteutuminen = "OK"

$$t_1 \geq 2.5\text{mm} \rightarrow 10\cdot\text{mm} \geq 2.5\cdot\text{mm}$$

Toteutuminen = "OK"

$$t_2 \geq 2.5\text{mm} \rightarrow 5\cdot\text{mm} \geq 2.5\cdot\text{mm}$$

Toteutuminen = "OK"

Uumasauvat:

$$\frac{b_2}{b_0} = \frac{100\cdot\text{mm}}{140\cdot\text{mm}} = 0.71$$

$$\frac{b_2}{b_0} \geq 0.25$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{b_2}{t_2} = \frac{100\cdot\text{mm}}{5\cdot\text{mm}} = 20$$

$$\frac{b_2}{t_2} \leq 35$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{h_1}{t_1} = \frac{250\cdot\text{mm}}{10\cdot\text{mm}} = 25$$

$$\frac{h_1}{t_1} \leq 35$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{h_2}{t_2} = \frac{100\cdot\text{mm}}{5\cdot\text{mm}} = 20$$

$$\frac{h_2}{t_2} \leq 35$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{h_2}{b_2} = \frac{100\cdot\text{mm}}{100\cdot\text{mm}} = 1$$

$$0.5 \leq \frac{h_2}{b_2} \leq 2.0$$

Toteutuminen = "OK"

Paarresauva:

$$\frac{b_0}{t_0} = \frac{140\cdot\text{mm}}{6\cdot\text{mm}} = 23.33$$

$$\frac{b_0}{t_0} \leq 35$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{h_0}{t_0} = \frac{140\cdot\text{mm}}{6\cdot\text{mm}} = 23.33$$

$$\frac{h_0}{t_0} \leq 35$$

Toteutuminen = "OK"

$$\frac{h_0}{b_0} = \frac{140\cdot\text{mm}}{140\cdot\text{mm}} = 1$$

$$0.5 \leq \frac{h_0}{b_0} \leq 2.0$$

Toteutuminen = "OK"

PAARRESAUVAN JA UUMASAUVAN VÄLINEN LIITOS

Kestävyyskerroin $k_k = 0.8$ Kestävyyskerroin on 0,8, kun teräslaatu on S550 [SFS-EN 1993-1-8]

Paarteen pinnan murtuminen myötäämällä

Paarteen pinnan normaali-jännitykseen vaikuttaa paarteen puristusjännitys sekä taivutusmomentin aiheuttama taivutusjännitys.

Normaalivoima: $N_{0,Ed} = 9500 \cdot \text{N}$ (SCIA Engineer 16.1)

Puristuksesta aiheutuva jännitys: $\sigma_{N,0} := \frac{N_{0,Ed}}{A_0} = \frac{9500 \cdot \text{N}}{3123.29 \cdot \text{mm}^2} = 3.04 \cdot \text{MPa}$

Taivutuksesta aiheutuva jännitys: $\sigma_{M,0} := \frac{M_{0,Ed}}{W_{el,0}} = \frac{15.5 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}}{131490 \cdot \text{mm}^3} = 117.88 \cdot \text{MPa}$

Paarteen pinnan normaali-jännitys: $\sigma := \sigma_{M,0} - \sigma_{N,0} = 1.18 \times 10^8 \cdot \text{Pa} - 3.04 \times 10^6 \cdot \text{Pa} = 114.84 \cdot \text{MPa}$

$k_n := 1$ Parre on vedetty

$\beta := \frac{b_2}{b_0} = \frac{100 \cdot \text{mm}}{140 \cdot \text{mm}} = 0.71$

$\eta := \frac{h_2}{b_0} = \frac{100 \cdot \text{mm}}{140 \cdot \text{mm}} = 0.71$

$$N_{2,Rd} := k_k \cdot \frac{\frac{k_n \cdot f_{y,0} \cdot t_0^2}{(1 - \beta) \cdot \sin(\theta)} \cdot \left(\frac{2 \cdot \eta}{\sin(\theta)} + 4 \cdot \sqrt{1 - \beta} \right)}{\gamma_{M5}} = 0.8 \cdot \frac{\frac{550 \cdot \text{MPa} \cdot (6 \cdot \text{mm})^2}{(1 - 0.71) \cdot \sin(33^\circ)} \cdot \left(\frac{2 \cdot 0.71}{\sin(33^\circ)} + 4 \cdot \sqrt{1 - 0.71} \right)}{1}$$

$N_{2,Rd} = 484.64 \cdot \text{kN}$ (S550: Kestävyyskerroin 0,8)

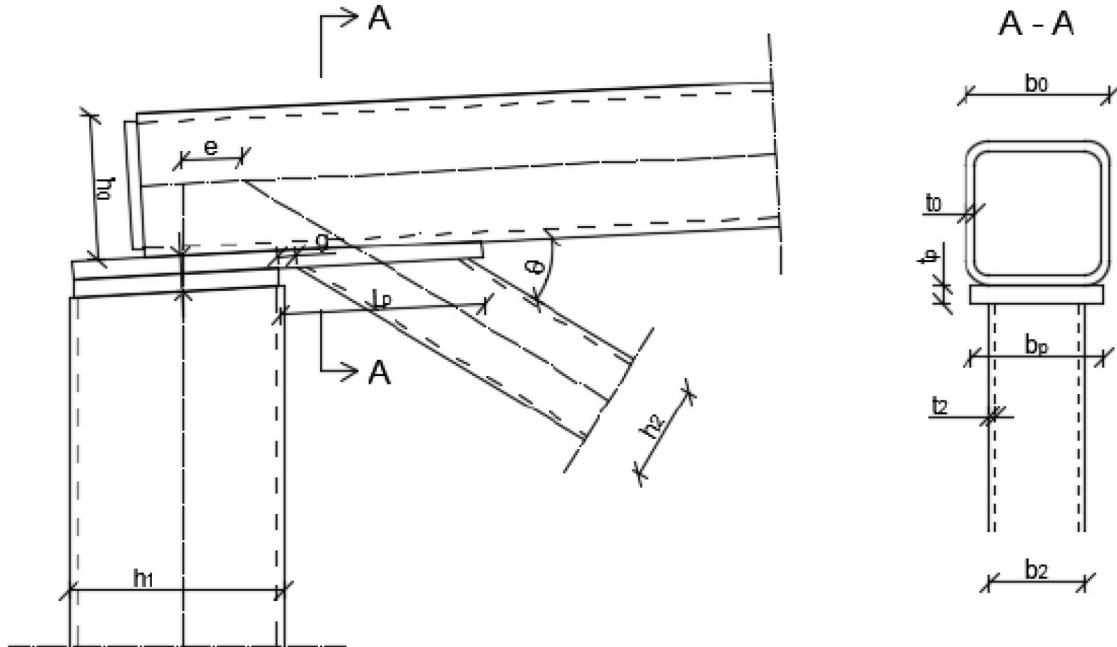
$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pinnan_murtuminen}} := \frac{N_{2,Ed}}{N_{2,Rd}} = \frac{605300 \cdot \text{N}}{484638.638 \cdot \text{N}}$

$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pinnan_murtuminen}} = 1.25$

KÄYTTÖASTE = "EI KESTÄ!"

Paarteen pinnan murtuminen myötäämällä, vahvistettu liitos

Koska paarteen pinta ei kestä, vahvistetaan liitosta hitsaamalla paarteen pintaan levy. Levy on esitettyä alla olevissa kuvissa.



Vahvikelevy

$$b_p := 170\text{mm} \quad L_p := 300\text{mm} \quad t_p := 20\text{mm}$$

$$\text{myötöraja } f_{y,p} := 550\text{MPa} \quad \text{vetomurtolujuus } f_{u,p} := 600\text{MPa}$$

Voimassaoloehdot

$$f_{y,p} \geq f_{y,0} = 550\text{MPa} \geq 550\text{MPa}$$

$$b_0 - 2 \cdot t_0 = 140\text{mm} - 2 \cdot 6\text{mm} = 128\text{mm}$$

$$2 \cdot t_2 = 2 \cdot 5\text{mm} = 10\text{mm}$$

$$b_p \geq b_0 - 2 \cdot t_0$$

$$t_p \geq 2 \cdot t_2$$

$$\frac{h_2}{\sin(\theta)} + \sqrt{b_p \cdot (b_p - b_2)} = \frac{100\text{mm}}{\sin(33^\circ)} + \sqrt{170\text{mm} \cdot (170\text{mm} - 100\text{mm})} = 292.69\text{mm}$$

$$L_p \geq \frac{h_2}{\sin(\theta)} + \sqrt{b_p \cdot (b_p - b_2)}$$

Toteutuminen = "OK"

Toteutuminen = "OK"

Toteutuminen = "OK"

Toteutuminen = "OK"

Tekijä β

$$\beta_p := \frac{b_2}{b_p} = \frac{100\text{mm}}{170\text{mm}} = 0.59$$

Tekijä η

$$\eta_p := \frac{h_2}{b_p} = \frac{100\text{mm}}{170\text{mm}} = 0.59$$

Paarteen pinnan kestävyys:

$$N_{2,Rd} := k_k \cdot \frac{\frac{k_n \cdot f_{y,p} \cdot t_p^2}{(1 - \beta_p) \cdot \sin(\theta)} \cdot \left(\frac{2 \cdot \eta_p}{\sin(\theta)} + 4 \cdot \sqrt{1 - \beta_p} \right)}{\gamma_{M5}} = 0.8 \cdot \frac{\frac{550 \cdot \text{MPa} \cdot (20 \cdot \text{mm})^2}{(1 - 0.59) \cdot \sin(33^\circ)} \cdot \left(\frac{2 \cdot 0.59}{\sin(33^\circ)} + 4 \cdot \sqrt{1 - 0.59} \right)}{1}$$

$$N_{2,Rd} = 3709.59 \cdot \text{kN}$$

(S550: Kestävyyskerroin 0,8)

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pinnan_murtuminen}} := \frac{N_{2,Ed}}{N_{2,Rd}} = \frac{605300 \cdot \text{N}}{3709594 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pinnan_murtuminen}} = 0.16$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen, vahvistettu liitos

Tehollinen leveys:

$$b_{e,p} := \frac{10}{\frac{b_p}{t_p}} \cdot b_2 = \frac{10}{\frac{170 \cdot \text{mm}}{20 \cdot \text{mm}}} \cdot 100 \cdot \text{mm} = 117.65 \cdot \text{mm}$$

$$b_{e,p} := \min(b_{e,p}, b_2) = \min(0.12 \cdot \text{m}, 100 \cdot \text{mm}) = 0.1 \cdot \text{m}$$

$$N_{2,Rd} := k_k \cdot \frac{\frac{f_{y,p} \cdot t_p}{\sqrt{3} \cdot \sin(\theta)} \cdot \left(\frac{2 \cdot h_2}{\sin(\theta)} + 2 \cdot b_{e,p} \right)}{\gamma_{M5}} = 0.8 \cdot \frac{\frac{550 \cdot \text{MPa} \cdot 20 \cdot \text{mm}}{\sqrt{3} \cdot \sin(33^\circ)} \cdot \left(\frac{2 \cdot 100 \cdot \text{mm}}{\sin(33^\circ)} + 2 \cdot 0.1 \cdot \text{m} \right)}{1.00}$$

$$N_{2,Rd} = 5291289.42 \cdot \text{N}$$

(S550: Kestävyyskerroin 0,8)

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{lävistysleikkautuminen}} := \frac{N_{2,Ed}}{N_{2,Rd}} = \frac{605300 \cdot \text{N}}{5291289.42 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{lävistysleikkautuminen}} = 0.11$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Paarteen uuman lommahtaminen tai myötääminen

Paarteen sivun lommahduslujuus: $f_b := f_{y,0} = 550 \cdot \text{MPa}$ (vedetty paarre)

$$N_{2,Rd} := k_k \cdot \frac{\frac{f_b \cdot t_0}{\sin(\theta)} \cdot \left(\frac{2 \cdot h_2}{\sin(\theta)} + 10 \cdot t_0 \right)}{\gamma_{M5}} = 1 \cdot \frac{\frac{550000000 \cdot \text{Pa} \cdot 6 \cdot \text{mm}}{\sin(33^\circ)} \cdot \left(\frac{2 \cdot 100 \cdot \text{mm}}{\sin(33^\circ)} + 10 \cdot 6 \cdot \text{mm} \right)}{1}$$

$$N_{2,Rd} = 2070820.04 \cdot \text{N}$$

(S550: Kestävyyskerroin 0,8)

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uuman_myötääminen}} := \frac{N_{2,Ed}}{N_{2,Rd}} = \frac{605300 \cdot \text{N}}{2070820.04 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uuman_myötääminen}} = 0.29$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Uumasauvan murtuminen myötäämällä, vahvistettu liitos

$$\text{Uumasauvan tehollinen leveys } b_{\text{eff}} := \frac{10}{\frac{b_p}{t_p}} \cdot \frac{f_{y,p} \cdot t_p}{f_{y,2} \cdot t_2} \cdot b_2 = \frac{10}{\frac{170 \cdot \text{mm}}{20 \cdot \text{mm}}} \cdot \frac{550 \cdot \text{MPa} \cdot 20 \cdot \text{mm}}{420 \cdot \text{MPa} \cdot 5 \cdot \text{mm}} \cdot 100 \cdot \text{mm} = 616.25 \cdot \text{mm}$$

$$b_{\text{eff}} := \min(b_{\text{eff}}, b_2) = \min(0.62 \cdot \text{m}, 100 \cdot \text{mm}) = 0.1 \text{ m}$$

$$N_{2,Rd} := k_k \cdot \frac{f_{y,2} \cdot t_2 \cdot (2 \cdot h_2 - 4 \cdot t_2 + 2 \cdot b_{\text{eff}})}{\gamma_{M5}} = 0.8 \cdot \frac{420 \cdot \text{MPa} \cdot 5 \cdot \text{mm} \cdot (2 \cdot 100 \cdot \text{mm} - 4 \cdot 5 \cdot \text{mm} + 2 \cdot 0.1 \cdot \text{m})}{1.00}$$

$$N_{2,Rd} = 651000 \cdot \text{N} \quad (\text{S550: Kestävyyskerroin } 0,8)$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uumasauvan_murtuminen}} := \frac{N_{2,Ed}}{N_{2,Rd}} = \frac{605300 \cdot \text{N}}{651000 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uumasauvan_murtuminen}} = 0.93$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Liitoksen kestävyys:

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pinnan_murtuminen}} = 0.16$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{lävistysleikkautuminen}} = 0.11$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uuman_myötääminen}} = 0.29$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{uumasauvan_murtuminen}} = 0.93$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{liitos}} = 0.93$$

YLÄPAARTEEN KESTÄVYYS TUELLA

Yläpaarteen päätä rasittavat voimat

Leikkausvoima $Q_{0.Ed} = 301.9 \cdot \text{kN}$

Taivutusmomentti $M_{0.Ed} = 15.5 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

Normaalivoima $N_{0.Ed} = 9.5 \cdot \text{kN}$

Taivutuskestävyys

Taivutuskestävyyden mitoitusarvo: $M_{pl.Rd} := \frac{W_{pl.0} \cdot f_{y,0}}{\gamma_{M0}} = \frac{1.55 \times 10^5 \cdot \text{mm}^3 \cdot 550 \cdot \text{MPa}}{1}$

$$M_{pl.Rd} = 85.43 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus}} := \frac{M_{0.Ed}}{M_{pl.Rd}} = \frac{15.50 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}}{85.43 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus}} = 0.18$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Puristuskestävyys

Puristuskestävyyden mitoitusarvo: $N_{c.Rd} := \frac{A_0 \cdot f_{y,0}}{\gamma_{M0}} = \frac{3123.29 \cdot \text{mm}^2 \cdot 550 \cdot \text{MPa}}{1}$

$$N_{c.Rd} = 1717.81 \cdot \text{kN}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{puristus}} := \frac{N_{0.Ed}}{N_{c.Rd}} = \frac{9500.00 \cdot \text{N}}{1717809.50 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{puristus}} = 0.01$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Taivutuksen ja normaaliveiman yhteisvaikutus

$$N_{0.25.Rd} := 0.25 \cdot N_{c.Rd} = 0.25 \cdot 1.72 \times 10^6 \cdot N = 429.45 \cdot kN$$

$$N_{0.Ed} \leq N_{0.25.Rd} = 9500.00 \cdot N \leq 429452.38 \cdot N$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

$$N_{0.5.Rd} := \frac{0.5 \cdot h_0 \cdot t_0 \cdot f_{y,0}}{\gamma_{M0}} = \frac{0.5 \cdot 140 \cdot mm \cdot 6 \cdot mm \cdot 550 \cdot MPa}{1} = 231 \cdot kN$$

$$N_{0.Ed} \leq N_{0.5.Rd} = 9500 \cdot N \leq 231000 \cdot N$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"Taivutusmomentin ja normaaliveiman yhteisvaikutus: **YHTEISVAIKUTUS = "EI TARVITSE TUTKIA!"**

Leikkauskestävyys

Leikkauspinta-ala:
$$A_v := \frac{A_0 \cdot h_0}{b_0 + h_0} = \frac{3123.29 \cdot \text{mm}^2 \cdot 140 \cdot \text{mm}}{140 \cdot \text{mm} + 140 \cdot \text{mm}} = 1561.64 \cdot \text{mm}^2$$

Leikkauskestävyyden mitoitusarvo:
$$V_{pl.Rd} := \frac{A_v \cdot \left(\frac{f_{y,0}}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} = \frac{0.00156 \cdot \text{m}^2 \cdot \frac{550 \cdot \text{MPa}}{\sqrt{3}}}{1}$$

$$V_{pl.Rd} = 495.89 \cdot \text{kN}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{leikkaus}} := \frac{Q_{0.Ed}}{V_{pl.Rd}} = \frac{301900.00 \cdot \text{N}}{495888.89 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{leikkaus}} = 0.61$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Taivutusmomentin ja leikkausvoiman yhteisvaikutus: YHTEISVAIKUTUS = "TUTKITTAVA!"

Taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutus

Taivutusvastuksen pienennystekijä:
$$\rho := \left(\frac{2 \cdot Q_{0.Ed}}{V_{pl.Rd}} - 1 \right)^2 = \left(\frac{2 \cdot 301900 \cdot \text{N}}{495888.89 \cdot \text{N}} - 1 \right)^2 = 0.05$$

Taivutusmomentin ja leikkauskestävyyden yhteisvaikutuksen mitoitusarvo:

$$M_{v.Rd} := \left(W_{pl,0} - \frac{\rho \cdot A_v^2}{8 \cdot t_0} \right) \left(\frac{f_{y,0}}{\gamma_{M0}} \right) = \left[1.5533 \times 10^5 \cdot \text{mm}^3 - \frac{0.04735 \cdot (0.00156 \cdot \text{m}^2)^2}{8 \cdot 6 \cdot \text{mm}} \right] \cdot \frac{550 \cdot \text{MPa}}{1}$$

$$M_{v.Rd} = 84.11 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus_ja_leikkaus}} := \frac{M_{0.Ed}}{M_{v.Rd}} = \frac{15.50 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}}{84108.23 \cdot \text{N} \cdot \text{m}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus_ja_leikkaus}} = 0.18$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Liitoksen kestävyys

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{puristus}} = 0.01$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus}} = 0.18$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{leikkaus}} = 0.61$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus_ja_puristus}} = 0.14$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus_ja_leikkaus}} = 0.18$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{liitos}} = 0.61$$

YLÄPAARTEEN PÄÄN KESTÄVYYS PISTEVOIMALLE

Jotta saadaan varmalla puolella oleva yksinkertaistus, oletetaan pistekuorman siirtyvän ainoastaan pilarin sisäreunan kautta (paarteen taipuman johdosta). Kuorman voidaan olettaa siirtyvän liitoslevyjen läpi 45 asteen kulmassa (katso yllä oleva kuva).

Liitoslevyjen paksuudet: $t_p := 20\text{mm}$

Kuorman vaikutuspituus: $s_s := 2 \cdot t_p = 40 \cdot \text{mm}$

Puristusrasitus paarteelle: $N_{1,Ed} = 666.7 \cdot \text{kN}$

Tekijän C_F määrittäminen

Määritetään kuormitustapauksen mukainen tekijä C_F . Koska putken pää on jäykistetty levyllä, voidaan pistekuormaa pitää "kaukana sijaitsevana kuormana palkin päästä".

Kuorman vaikutuspituuden ja leveyden suhde: $\frac{s_s}{t_0} = 6.67$ (suhteen perusteella valitaan tekijän C_F laskentakaava)

Tekijän C_F laskennassa käytettävät termit:

Putken nurkan sisäsäde: $r_{0i} := r_0 - t_0 = 12 \cdot \text{mm} - 6 \cdot \text{mm} = 6 \cdot \text{mm}$

Aputermi: $k := \frac{f_{y,0}}{228\text{MPa}} = \frac{550 \cdot \text{MPa}}{228 \cdot \text{MPa}} = 2.41$

Termi: $k_1 := 1.33 - 0.33 \cdot k = 1.33 - 0.33 \cdot 2.41 = 0.53$

Termi: $k_2 := 1.15 - 0.15 \cdot \frac{r_{0i}}{t_0} = 1.15 - 0.15 \cdot \frac{0.01 \cdot \text{m}}{6 \cdot \text{mm}} = 1$

$$\text{Alaraja}_{k2} := k_2 \geq 0.5 = 1 \geq 0.5$$

$$\text{Yläraja}_{k2} := k_2 \leq 1.0 = 1 \leq 1$$

Termi: $k_3 := 1.0$

Termi: $k_4 := 1.22 - 0.22 \cdot k = 1.22 - 0.22 \cdot 2.41 = 0.69$

Termi: $k_5 := 1.06 - 0.06 \cdot \frac{r_{0i}}{t_0} = 1$

$$\text{Yläraja}_{k5} := k_5 \leq 1.0 = 1 \leq 1$$

$$C_F := k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot \left[14.7 - \left(\frac{h_0 - t_0}{49.5} \right) \right] \cdot \left(1 + 0.007 \cdot \frac{s_s}{t_0} \right) = 1 \cdot 0.69 \cdot \left(14.7 - \frac{140 \cdot \text{mm} - 6 \cdot \text{mm}}{49.5} \right) \cdot \left(1 + 0.01 \cdot \frac{0.04 \cdot \text{m}}{6 \cdot \text{mm}} \right)$$

$$C_F = 10.28$$

Yhden uuman pistekuormakestävyys:

$$F_{w,Rd} := C_F \cdot \frac{t_0^2 \cdot f_{y,0}}{\gamma_{M1}} = 10.28 \cdot \frac{(6 \cdot \text{mm})^2 \cdot 550 \cdot \text{MPa}}{1}$$

$$F_{w,Rd} = 203544.66 \cdot \text{N}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pistekuorma}} := \frac{0.5 \cdot N_{1,Ed}}{F_{w,Rd}} = \frac{0.5 \cdot 666700 \cdot \text{N}}{203544.655805068 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pistekuorma}} = 1.64$$

KÄYTTÖASTE = "EI KESTÄ!"



YLÄPAARTEEN VAHVISTETUN PÄÄN KESTÄVYYS PISTEVOIMALLE

Vahvistetaan yläpaarteen kylkiä 5 mm vahvoilla levyillä. $t_v := 5\text{mm}$

Liitoslevyjen paksuudet: $t_p := 20\text{mm}$

Kuorman vaikutuspituus: $s_s := 2 \cdot t_p = 40 \cdot \text{mm}$

Puristusrasitus paarteelle: $N_{1,Ed} = 666.7 \cdot \text{kN}$

Tekijän C_F määrittäminen

Määritetään kuormitustapauksen mukainen tekijä C_F . Koska putken pää on jäykistetty levyllä, voidaan pistekuormaa pitää "kaukana sijaitsevana kuormana palkin päästä".

Kuorman vaikutuspituuden ja leveyden suhde: $\frac{s_s}{t_0 + t_v} = 3.64$ (suhteen perusteella valitaan tekijän C_F laskentakaava)

Tekijän C_F laskennassa käytettävät termit:

Putken nurkan sisäsäde: $r_{0i} := r_0 - t_0 = 12 \cdot \text{mm} - 6 \cdot \text{mm} = 6 \cdot \text{mm}$

Aputermi: $k := \frac{f_{y,0}}{228\text{MPa}} = \frac{550 \cdot \text{MPa}}{228 \cdot \text{MPa}} = 2.41$

Termi: $k_1 := 1.33 - 0.33 \cdot k = 1.33 - 0.33 \cdot 2.41 = 0.53$

Termi: $k_2 := 1.15 - 0.15 \cdot \frac{r_{0i}}{t_0} = 1.15 - 0.15 \cdot \frac{0.01 \cdot \text{m}}{6 \cdot \text{mm}} = 1$

$$\text{Alaraja}_{k2} := k_2 \geq 0.5 = 1 \geq 0.5$$

$$\text{Yläraja}_{k2} := k_2 \leq 1.0 = 1 \leq 1$$

Termi: $k_3 := 1.0$

Termi: $k_4 := 1.22 - 0.22 \cdot k = 1.22 - 0.22 \cdot 2.41 = 0.69$

Termi: $k_5 := 1.06 - 0.06 \cdot \frac{r_{0i}}{t_0} = 1$

$$\text{Yläraja}_{k5} := k_5 \leq 1.0 = 1 \leq 1$$

$$C_F := k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot \left[14.7 - \left(\frac{h_0 - t_0}{t_0 + t_v} \right) \right] \cdot \left(1 + 0.007 \cdot \frac{s_s}{t_0 + t_v} \right) = 1 \cdot 0.69 \cdot \left(14.7 - \frac{140 \cdot \text{mm} - 6 \cdot \text{mm}}{6 \cdot \text{mm} + 5 \cdot \text{mm}} \right) \cdot \left(1 + 0.01 \cdot \frac{0.04 \cdot \text{m}}{6 \cdot \text{mm} + 5 \cdot \text{mm}} \right)$$

$$C_F = 10.22$$

Yhden uuman pistekuormakestävyys:

$$F_{w,Rd} := C_F \cdot \frac{\left[(t_0 + t_v)^2 \right] \cdot f_{y,0}}{\gamma_{M1}} = 10,22 \cdot \frac{(6 \cdot \text{mm} + 5 \cdot \text{mm})^2 \cdot 550 \cdot \text{MPa}}{1}$$

$$F_{w,Rd} = 679918,37 \cdot \text{N}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pistekuorma}} := \frac{0,5 \cdot N_{1,Ed}}{F_{w,Rd}} = \frac{0,5 \cdot 666700 \cdot \text{N}}{679918,366994152 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pistekuorma}} = 0,49$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"



Liitoksen kestävyys

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{puristus}} = 0,01$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{taivutus}} = 0,18$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{leikkaus}} = 0,61$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{pistekuorma}} = 0,49$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{liitos}} = 0,61$$

Käyttöaste vahvistamattomana oli 1,11. Käytetty menetelmä on kehitetty eri tilanteisiin, jossa sitä nyt käytettiin. Koska paarteen murtumista ei kokeissa havaittu, menetelmä on selvästi varmalla puolella.

RUUVILIITOKSEN KESTÄVYYS

Leikkausrasitus ruuveille: $Q_{3.Ed} = 9.5 \cdot \text{kN}$

Ruuvien ja levyjen parametrit**Ruuvit**

Halkaisija

$$d := 30 \text{ mm}$$

Poikkileikkausala

$$A := \pi \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{30 \cdot \text{mm}}{2} \right)^2 = 706.86 \cdot \text{mm}^2$$

Myötöraja

$$f_{yb} := 640 \text{ MPa}$$

Murtoraja

$$f_{ub} := 800 \text{ MPa}$$

Levyt

Paksuus

$$t_p = 20 \cdot \text{mm}$$

Myötöraja

$$f_y := 550 \text{ MPa}$$

Murtolujuus

$$f_u := 600 \text{ MPa}$$

Ruuvien reiän koko:

$$d_0 := 33 \text{ mm}$$

Reunaetäisyyden minimiarvo:

$$\min_{e1} := 1.2 \cdot d_0 = 1.2 \cdot 33 \cdot \text{mm} = 39.6 \cdot \text{mm}$$

Reunaetäisyyden minimiarvo:

$$\min_{e2} := 1.2 \cdot d_0 = 1.2 \cdot 33 \cdot \text{mm} = 39.6 \cdot \text{mm}$$

Reunaetäisyys

$$e_1 := 85 \text{ mm} \quad e_1 \geq \min_{e1} = 85 \cdot \text{mm} \geq 0.04 \cdot \text{m}$$

Reunaetäisyys

$$e_2 := 50 \text{ mm} \quad e_2 \geq \min_{e2} = 50 \cdot \text{mm} \geq 0.04 \cdot \text{m}$$

Leikkauskestävyys

Ruuvien lujuusluokasta riippuva kerroin: $\alpha_v := 0.6$

Ruuvien jännityspoikkipinta-ala: $A_s = 561 \cdot \text{mm}^2$

(Ruuvien kierteet ovat leikkaustasossa)

Leikkauslujuus leikettä kohti: $F_{v.Rd} := \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0.6 \cdot 800 \cdot \text{MPa} \cdot 0.000561 \cdot \text{m}^2}{1.25}$

$$F_{v.Rd} = 215424 \cdot \text{N}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_leikkauskestävyys}} := \frac{0.5 \cdot Q_{3.Ed}}{F_{v.Rd}} = \frac{0.5 \cdot 9500 \cdot \text{N}}{215424 \cdot \text{N}}$$

(Leikkausvoima vaikuttaa kahteen ruuviin)

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_leikkauskestävyys}} = 0.02$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Reunapuristuskestävyys

Voiman suunnasta riippuva tekijä: $a_d := \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{85 \cdot \text{mm}}{3 \cdot 33 \cdot \text{mm}} = 0.86$

$$\text{suhde}_f := \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800 \cdot \text{MPa}}{600 \cdot \text{MPa}} = 1.33$$

$$a_b := \min(a_d, \text{suhde}_f, 1.0) = \min(0.86, 1.33, 1) = 0.86$$

Voiman suunnasta riippuva tekijä: $\text{suhde}_{ed} := 2.8 \cdot \frac{e_2}{d_0} = 2.8 \cdot \frac{50 \cdot \text{mm}}{33 \cdot \text{mm}} = 4.24$

$$k_1 := \min(\text{suhde}_{ed}, 2.5) = \min(4.24, 2.5) = 2.5$$

Reunapuristuslujuus: $F_{b,Rd} := \frac{k_1 \cdot a_b \cdot f_u \cdot d \cdot t_p}{\gamma_{M2}} = \frac{2.5 \cdot 0.86 \cdot 600 \cdot \text{MPa} \cdot 30 \cdot \text{mm} \cdot 0.02 \cdot \text{m}}{1.25}$

$$F_{b,Rd} = 618181.82 \cdot \text{N}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{reunapuristuskestävyys}} := \frac{0.5 \cdot Q_{3,Ed}}{F_{b,Rd}} = \frac{0.5 \cdot 9500 \cdot \text{N}}{618181.82 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{reunapuristuskestävyys}} = 0.01$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Ruuvien vetorasitus

Ruuveille tulee vapaakappalekuvan mukaisesti vetorasitusta voiman $N_{3,Ed}$ suuruuden verran. Voima jakautuu kahdelle ruuville.

Vetorasitus kahdelle ruuville: $N_{3,Ed} = 300.5 \cdot \text{kN}$

Pienennyskerroin $k_2 := 0.9$ (ruuvi ei ole uppokantainen)

Ruuvien jännityspoikkipinta-ala: $A_s = 561 \cdot \text{mm}^2$

Vetokestävyys: $F_{t,Rd} := \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \cdot 800 \cdot \text{MPa} \cdot 0.000561 \cdot \text{m}^2}{1.25}$

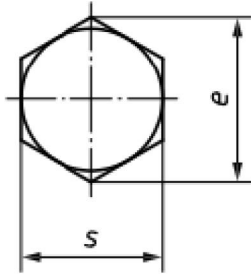
$$F_{t,Rd} = 323136 \cdot \text{N}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_vetokestävyys}} := \frac{0.5 \cdot N_{3,Ed}}{F_{t,Rd}} = \frac{0.5 \cdot 300500 \cdot \text{N}}{323136 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_vetokestävyys}} = 0.46$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Ruuvien ja mutterin lävistymiskestävyys



[SFS-EN ISO 4014]

Ruuvien halkaisija: $d = 30 \cdot \text{mm}$

Avainmitta: $s = 46 \cdot \text{mm}$

Mitta: $e = 50.85 \cdot \text{mm}$

Mitat s ja e löytyvät standardista SFS-EN ISO 4014

Ruuvien kannan etäisimpien pisteiden ja avainvälin keskiarvo: $d_m := \frac{s + e}{2} = \frac{0.05 \cdot m + 0.05 \cdot m}{2}$

$$d_m = 48.42 \cdot \text{mm}$$

Kiinnityslevyn paksuus:

$$t_p = 20 \cdot \text{mm}$$

Lävistymiskestävyys:

$$B_{p,Rd} := \frac{0.6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0.6 \cdot \pi \cdot 0.05 \cdot m \cdot 0.02 \cdot m \cdot 600 \cdot \text{MPa}}{1.25}$$

$$B_{p,Rd} = 876278.16 \cdot \text{N}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_lävistymiskestävyys}} := \frac{0.5 \cdot N_{3,Ed}}{B_{p,Rd}} = \frac{0.5 \cdot 300500 \cdot \text{N}}{876278.155680494 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_lävistymiskestävyys}} = 0.17$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Yhdistetty leikkaus ja vetovoima

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{leikkaus_ja_veto}} := \frac{0.5 \cdot Q_{3,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{0.5 \cdot N_{3,Ed}}{1.4 \cdot F_{t,Rd}} = \frac{0.5 \cdot 9500 \cdot \text{N}}{215424 \cdot \text{N}} + \frac{0.5 \cdot 300500 \cdot \text{N}}{1.4 \cdot 323136 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{leikkaus_ja_veto}} = 0.35$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Liitoksen kestävyys

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_leikkauskestävyys}} = 0.02$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{reunapuristuskestävyys}} = 0.01$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_vetokestävyys}} = 0.46$$

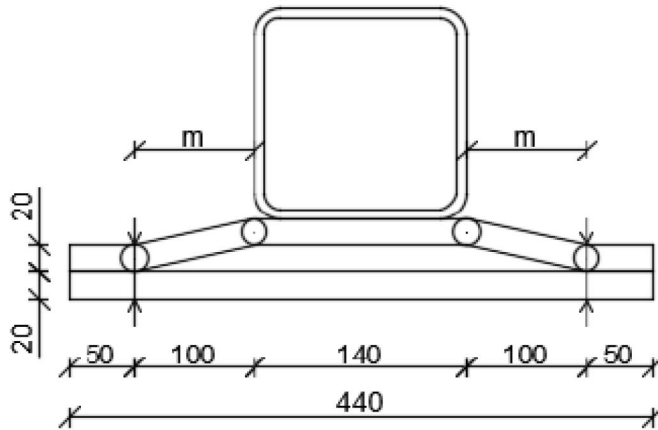
$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_lävistymiskestävyys}} = 0.17$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{leikkaus_ja_veto}} = 0.35$$

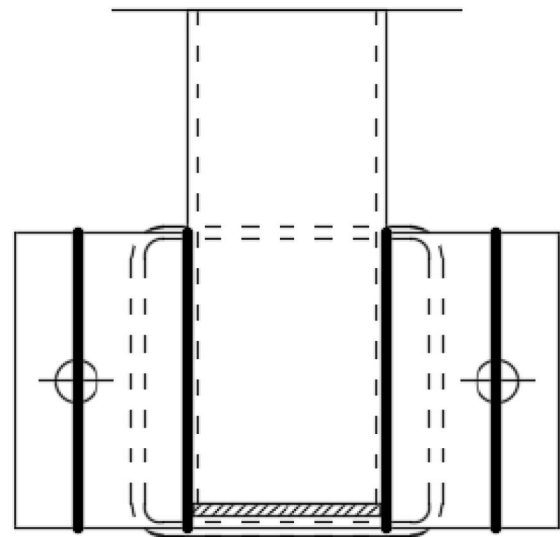
$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{liitos}} = 0.46$$

LIITOSLEVYN TANUTUSKESTÄVYYS

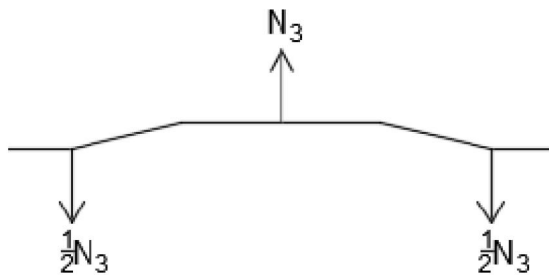
Murtumismuoto ja oletetut myötöviivat



Kuva: Murtumismuodon 1 mukainen murtuminen



Kuva: Oletetut myötöviivat



Kuva: Vapaakappalekuva

Levyn parametrit

Paksuus	$t_p := 20\text{mm}$
Pituus	$h_p := 170\text{mm}$
Myötöraja	$f_y := 550\text{MPa}$
Ruuvien reiän koko:	$d_0 := 33\text{mm}$
Reunaetäisyyden minimiarvo:	$\min_{e1} := 1.2 \cdot d_0 = 1.2 \cdot 33 \cdot \text{mm} = 39.6 \cdot \text{mm}$
Reunaetäisyyden minimiarvo:	$\min_{e2} := 1.2 \cdot d_0 = 1.2 \cdot 33 \cdot \text{mm} = 39.6 \cdot \text{mm}$
Reunaetäisyys	$e_1 := 85\text{mm} \quad e_1 \geq \min_{e1} = 85 \cdot \text{mm} \geq 0.04 \cdot m$
Reunaetäisyys	$e_2 := 50\text{mm} \quad e_2 \geq \min_{e2} = 50 \cdot \text{mm} \geq 0.04 \cdot m$
Ruuvien etäisyys laipan ulkopinnasta	$n := 50\text{mm} \quad n \leq \max_n$
Ruuvien etäisyys paarteen pinnasta	$m := 100\text{mm} \quad \max_n := 1.25 \cdot m = 1.25 \cdot 100 \cdot \text{mm} = 125 \cdot \text{mm}$

Murtumismalli 1: Täyden mekanismin syntyminen laipassa

Ekvivalentin T-osan laipan tehollinen pituus $l_{\text{eff}} := h_p = 170 \cdot \text{mm} = 170 \cdot \text{mm}$

Plastinen taivutusmomentti:
$$M_{\text{pl.1.Rd}} := \frac{l_{\text{eff}} \cdot t_p^2 \cdot f_y}{4 \cdot \gamma_{M0}} = \frac{0.17 \cdot \text{m} \cdot (0.02 \cdot \text{m})^2 \cdot 550 \cdot \text{MPa}}{4 \cdot 1}$$

$$M_{\text{pl.1.Rd}} = 9.35 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Kestävyyden mitoitusarvo
$$F_{\text{T.1.Rd}} := \frac{4 \cdot M_{\text{pl.1.Rd}}}{m} = \frac{4 \cdot 9.350 \cdot \text{N} \cdot \text{m}}{100 \cdot \text{mm}}$$

$$F_{\text{T.1.Rd}} = 374 \cdot \text{kN}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{laipan_myötääminen}} := \frac{N_{3,\text{Ed}}}{F_{\text{T.1.Rd}}} = \frac{300500 \cdot \text{N}}{374000 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{laipan_myötääminen}} = 0.803$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Murtumismalli 2: Ruuvien murtuminen, kun laippa samalla myötää

Ekvivalentin T-osan laipan tehollinen pituus $l_{\text{eff}} := h_p = 170 \cdot \text{mm}$

Plastinen taivutusmomentti:
$$M_{\text{pl.2.Rd}} := M_{\text{pl.1.Rd}} = 9.350 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

Ruuvien vetokestävyyden mitoitusarvo
$$F_{\text{t.Rd}} := \frac{0.9 \cdot f_{\text{ub}} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \cdot 800 \cdot \text{MPa} \cdot 0.000561 \cdot \text{m}^2}{1.25}$$

$$F_{\text{t.Rd}} = 323.14 \cdot \text{kN}$$

Ruuvien vetokestävyyksien summa
$$\Sigma F_{\text{t.Rd}} := 2 \cdot F_{\text{t.Rd}} = 646.27 \cdot \text{kN}$$

Kestävyyden mitoitusarvo
$$F_{\text{T.2.Rd}} := \frac{2 \cdot M_{\text{pl.2.Rd}} + n \cdot \Sigma F_{\text{t.Rd}}}{m + n} = \frac{2 \cdot 9.350 \cdot \text{N} \cdot \text{m} + 50 \cdot \text{mm} \cdot 646.27 \cdot \text{N}}{100 \cdot \text{mm} + 50 \cdot \text{mm}}$$

$$F_{\text{T.2.Rd}} = 340.09 \cdot \text{kN}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_murtuminen_1}} := \frac{N_{3,\text{Ed}}}{F_{\text{T.2.Rd}}} = \frac{300500 \cdot \text{N}}{340090.67 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_murtuminen_1}} = 0.88$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Murtumismalli 3: Ruuvien murtuminen

Ekvivalentin T-osan laipan tehollinen pituus $l_{\text{eff}} := h_p = 170 \cdot \text{mm} = 170 \cdot \text{mm}$

Ruuvien vetokestävyyden mitoitusarvo $F_{t,Rd} := \frac{0.9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \cdot 800 \cdot \text{MPa} \cdot 0.000561 \cdot \text{m}^2}{1.25}$

$$F_{t,Rd} = 323.14 \cdot \text{kN}$$

Ruuvien vetokestävyyksien summa $\Sigma F_{t,Rd} := 2 \cdot F_{t,Rd} = 646.27 \cdot \text{kN}$

Kestävyyden mitoitusarvo $F_{T,3,Rd} := \Sigma F_{t,Rd} = 646.27 \cdot \text{kN}$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_murtuminen_2}} := \frac{N_{3,Ed}}{F_{T,3,Rd}} = \frac{300500 \cdot \text{N}}{646272 \cdot \text{N}}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_murtuminen_2}} = 0.46$$

KÄYTTÖASTE = "OK!"

Liitoslevyn kestävyys

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{laipan_myötääminen}} = 0.803$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_murtuminen_1}} = 0.88$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{ruuvien_murtuminen_2}} = 0.46$$

$$\text{KÄYTTÖASTE}_{\text{liitoslevy}} = 0.88$$

RUUVIEN VETOVOIMA JA VENYMÄELEMENTIN POIKKILEIKKAUSALA

Unrein_large_col250_tested

Lähtötiedot

Kimmomoduli:	$E := 210\text{GPa}$	
Yhden ruuvin vetovoima:	$F := 89800\text{N}$	(FEM, Ansys 18.0)
Liitoslevyn paksuus:	$t_p := 20\text{mm}$	
Liitoslevyn pituus:	$h_p := 240\text{mm}$	
Paarteen korkeus:	$h_0 := 160\text{mm}$	
Ruuvin etäisyys paarteen kyljestä:	$m := 90\text{mm}$	
Ruuvin leikkauspinta-ala:	$A_s := 561\text{mm}^2$	
Ruuvin venymäpituus:	$L_b := 120\text{mm}$	

Jäykkyystekijä

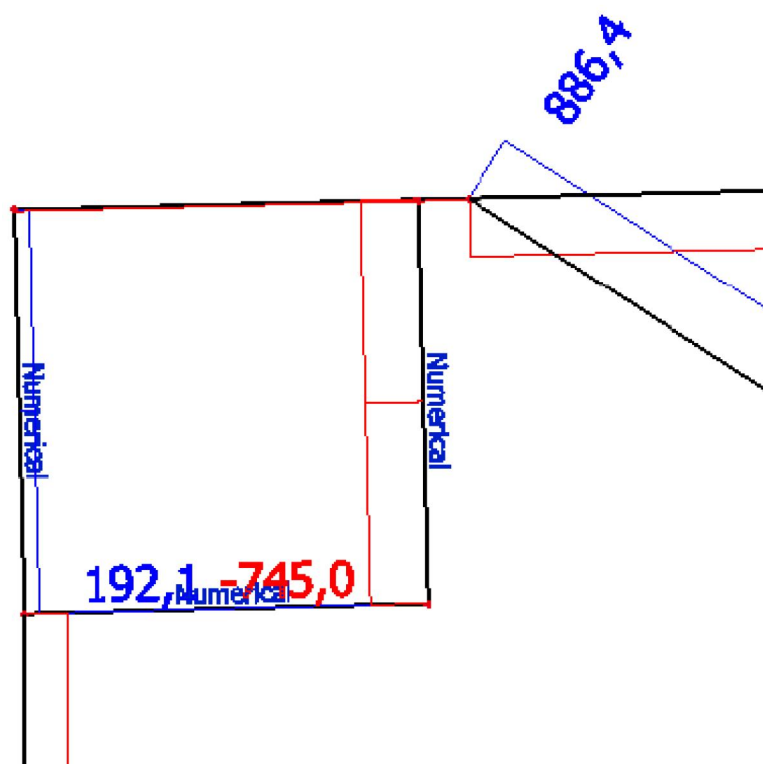
Efektiivinen leveys:	$l_{\text{eff}} := h_p = 240\cdot\text{mm}$
Venymäelementin pituus:	$L := 0.5\cdot h_0 + 2\cdot t_p = 0.5\cdot 160\cdot\text{mm} + 2\cdot 20\cdot\text{mm} = 120\cdot\text{mm}$
Päätylevyn taivutuksen jäykkyystekijä:	$k_5 := \frac{0.9\cdot l_{\text{eff}}\cdot t_p^3}{m^3} = \frac{0.9\cdot 0.24\cdot\text{m}\cdot (20\cdot\text{mm})^3}{(90\cdot\text{mm})^3} = 2.37\cdot\text{mm}$
Ruuvin vedon jäykkyystekijä:	$k_{10} := \frac{1.6\cdot A_s}{2\cdot L_b} = \frac{1.6\cdot 561\cdot\text{mm}^2}{2\cdot 120\cdot\text{mm}} = 3.74\cdot\text{mm}$
Jäykkyystekijä:	$k := \frac{1}{\frac{1}{E\cdot k_5} + \frac{1}{E\cdot k_{10}}} = \frac{1}{\frac{1}{210\cdot\text{GPa}\cdot 0.0024\cdot\text{m}} + \frac{1}{210\cdot\text{GPa}\cdot 0.0037\cdot\text{m}}}$ $k = 304676.93\cdot\frac{\text{N}}{\text{mm}}$

Laskentamallissa käytettävän venymäelementin poikkileikkausala

Venymäelementin poikkileikkausala:	$A := \frac{k\cdot L}{E} = \frac{304676930.537\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot 0.12\cdot\text{m}}{210\cdot\text{GPa}} = 174.1011\cdot\text{mm}^2$
Kahden ruuvin vetovoima yhteensä:	$F_{\text{ruuvit}} := 2\cdot F = 2\cdot 89800\cdot\text{N} = 179.6\cdot\text{kN}$

SCIA Engineer 16.1 -ohjelman antama vetorasitus venymäelementille

Versio 1: Vetorasitus on 192,1 kN



Versio 2: Vetorasitus on 207,4 kN



Rein_medi_col250_tested

Lähtötiedot

Kimmoduli:	$E := 210\text{GPa}$	
Yhden ruuvin vetovoima:	$F := 178000\text{N}$	(FEM, Ansys 18.0)
Liitoslevyn paksuus:	$t_p := 20\text{mm}$	
Liitoslevyn pituus:	$h_p := 260\text{mm}$	
Paarteen korkeus:	$h_0 := 140\text{mm}$	
Ruuvien etäisyys paarteen kyljestä:	$m := 100\text{mm}$	
Ruuvien leikkauspinta-ala:	$A_s := 561\text{mm}^2$	
Ruuvien venymäpituus:	$L_b := 120\text{mm}$	

Jäykkyystekijä

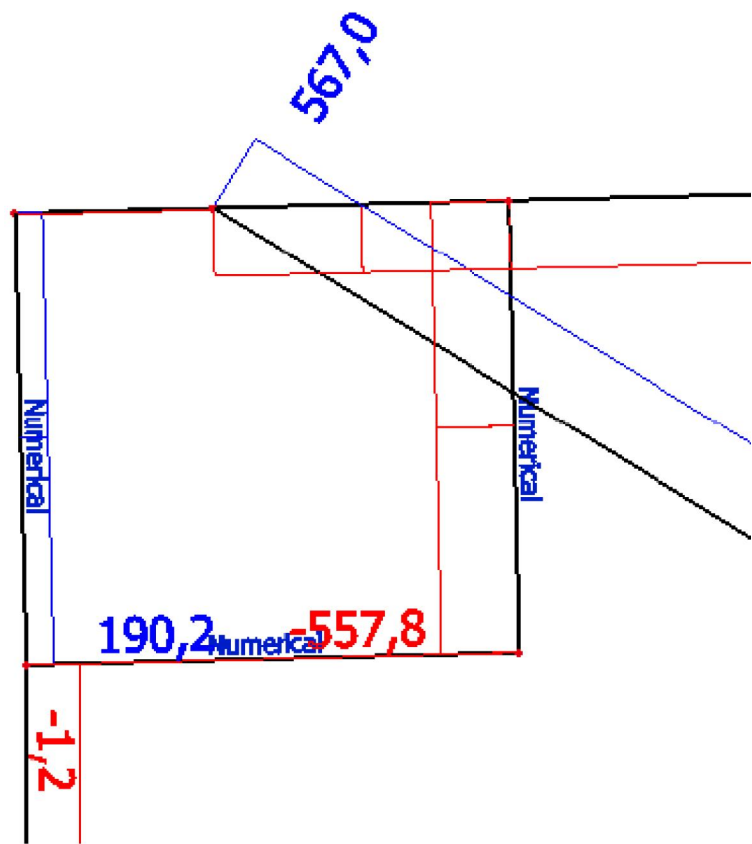
Efektiivinen leveys:	$l_{\text{eff}} := h_p = 260\cdot\text{mm}$
Venymäelementin pituus:	$L := 0.5\cdot h_0 + 2\cdot t_p = 0.5\cdot 140\cdot\text{mm} + 2\cdot 20\cdot\text{mm} = 110\cdot\text{mm}$
Päätylevyn taivutuksen jäykkyystekijä:	$k_5 := \frac{0.9\cdot l_{\text{eff}}\cdot t_p^3}{m^3} = \frac{0.9\cdot 0.26\cdot\text{m}\cdot (20\cdot\text{mm})^3}{(100\cdot\text{mm})^3} = 1.87\cdot\text{mm}$
Ruuvien vedon jäykkyystekijä:	$k_{10} := \frac{1.6\cdot A_s}{2\cdot L_b} = \frac{1.6\cdot 561\cdot\text{mm}^2}{2\cdot 120\cdot\text{mm}} = 3.74\cdot\text{mm}$
Jäykkyystekijä:	$k := \frac{1}{\frac{1}{E\cdot k_5} + \frac{1}{E\cdot k_{10}}} = \frac{1}{\frac{1}{210\cdot\text{GPa}\cdot 0.0019\cdot\text{m}} + \frac{1}{210\cdot\text{GPa}\cdot 0.0037\cdot\text{m}}}$
	$k = 261986.6\cdot\frac{\text{N}}{\text{mm}}$

Laskentamallissa käytettävän venymäelementin poikkileikkausala

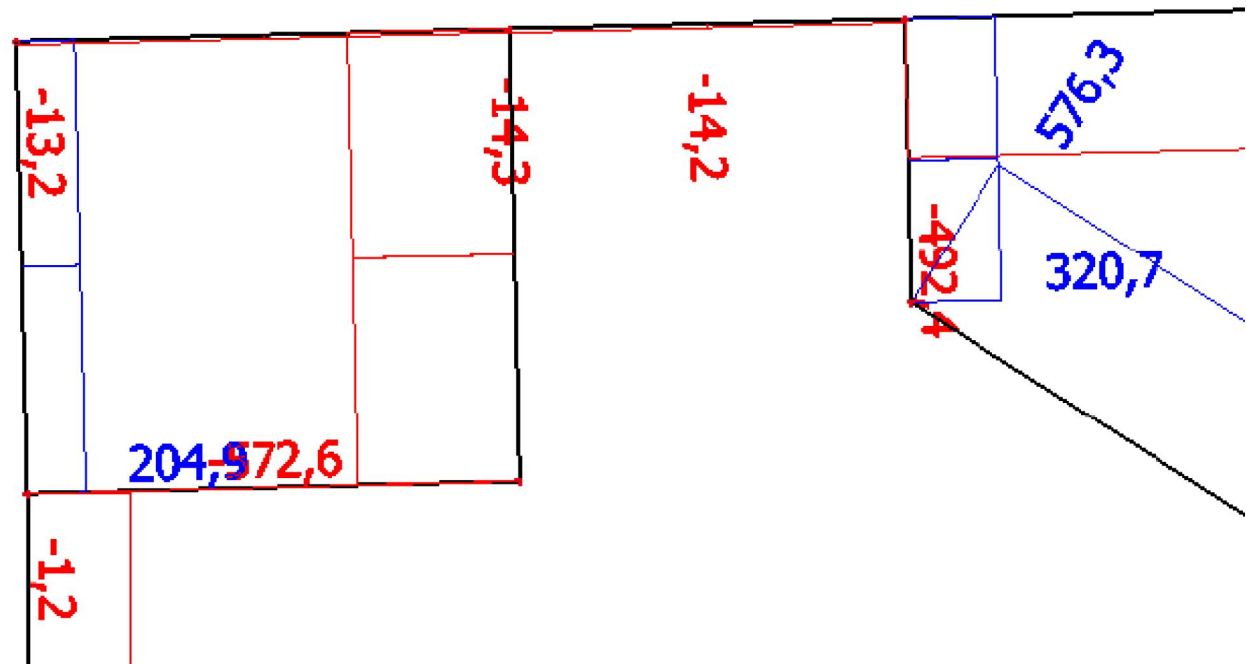
Venymäelementin poikkileikkausala:	$A := \frac{k\cdot L}{E} = \frac{261986600.142552\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot 0.11\cdot\text{m}}{210\cdot\text{GPa}} = 137.2311\cdot\text{mm}^2$
Kahden ruuvien vetovoima yhteensä:	$F_{\text{ruuvit}} := 2\cdot F = 2\cdot 178000\cdot\text{N} = 356\cdot\text{kN}$

SCIA Engineer 16.1 -ohjelman antama vetorasitus venymäelementille

Versio 1: vetorasitus on 190,2 kN



Versio 2: Vetorasitus on 204,9 kN



[illegible]

Unrein_small_col300

Lähtötiedot

Kimmoduli:	$E := 210\text{GPa}$	
Yhden ruuvien vetovoima:	$F := 57640\text{N}$	(FEM, Ansys 18.0)
Liitoslevyn paksuus:	$t_p := 15\text{mm}$	
Liitoslevyn pituus:	$h_p := 290\text{mm}$	
Paarteen korkeus:	$h_0 := 120\text{mm}$	
Ruuvien etäisyys paarteen kyljestä:	$m := 140\text{mm}$	
Ruuvien leikkauspinta-ala:	$A_s := 245\text{mm}^2$	
Ruuvien venymäpituus:	$L_b := 30\text{mm}$	

Jäykkyystekijä

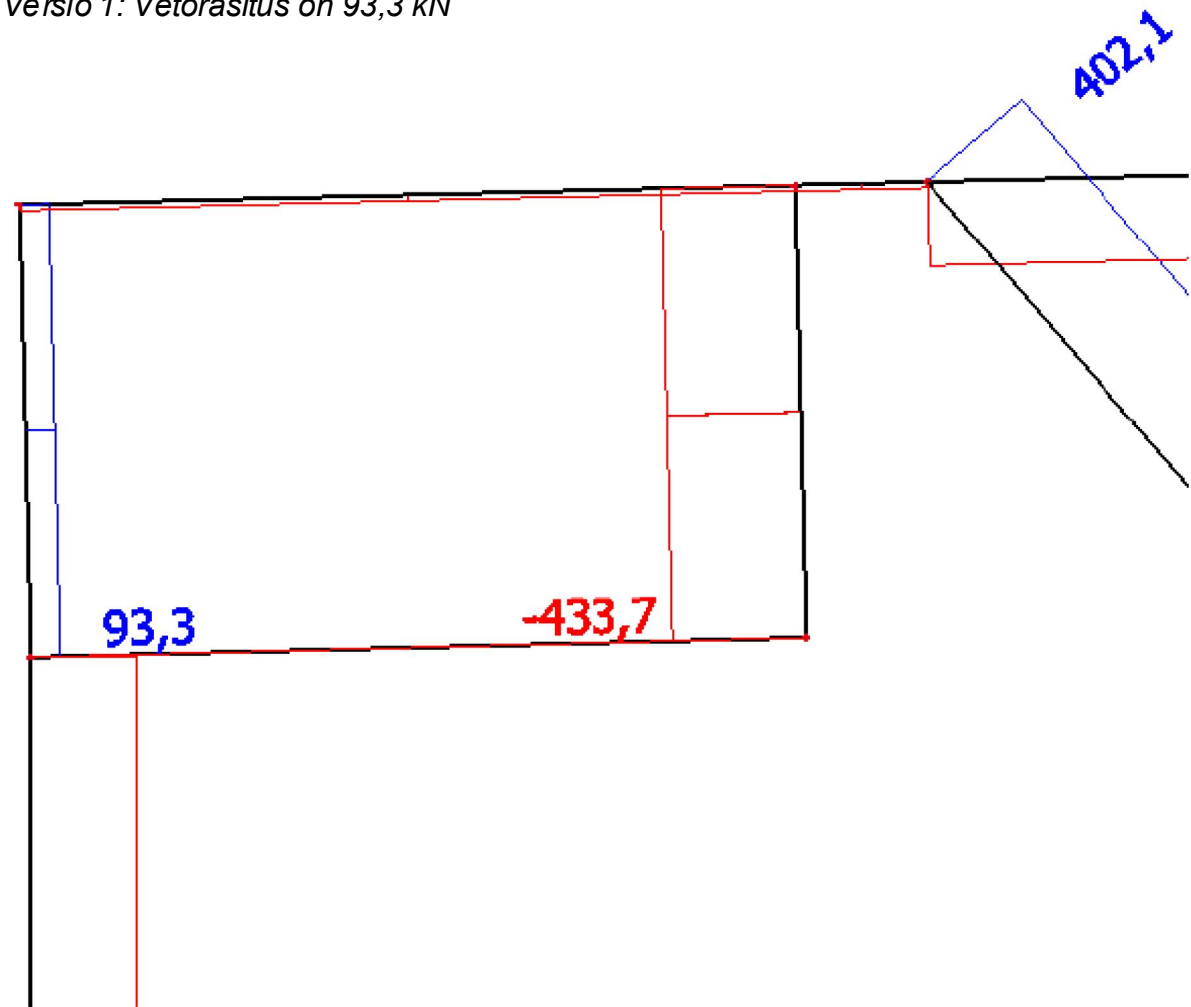
Efektiivinen leveys:	$l_{\text{eff}} := h_p = 290\cdot\text{mm}$
Venymäelementin pituus:	$L := 0.5\cdot h_0 + 2\cdot t_p = 0.5\cdot 120\cdot\text{mm} + 2\cdot 15\cdot\text{mm} = 90\cdot\text{mm}$
Päätylevyn taivutuksen jäykkyystekijä:	$k_5 := \frac{0.9\cdot l_{\text{eff}}\cdot t_p^3}{m^3} = \frac{0.9\cdot 0.29\cdot\text{m}\cdot (15\cdot\text{mm})^3}{(140\cdot\text{mm})^3} = 0.32\cdot\text{mm}$
Ruuvien vedon jäykkyystekijä:	$k_{10} := \frac{1.6\cdot A_s}{2\cdot L_b} = \frac{1.6\cdot 245\cdot\text{mm}^2}{2\cdot 30\cdot\text{mm}} = 6.53\cdot\text{mm}$
Jäykkyystekijä:	$k := \frac{1}{\frac{1}{E\cdot k_5} + \frac{1}{E\cdot k_{10}}} = \frac{1}{\frac{1}{210\cdot\text{GPa}\cdot 0.0003\cdot\text{m}} + \frac{1}{210\cdot\text{GPa}\cdot 0.0065\cdot\text{m}}}$
	$k = 64256.62\cdot\frac{\text{N}}{\text{mm}}$

Laskentamallissa käytettävän venymäelementin poikkileikkausala

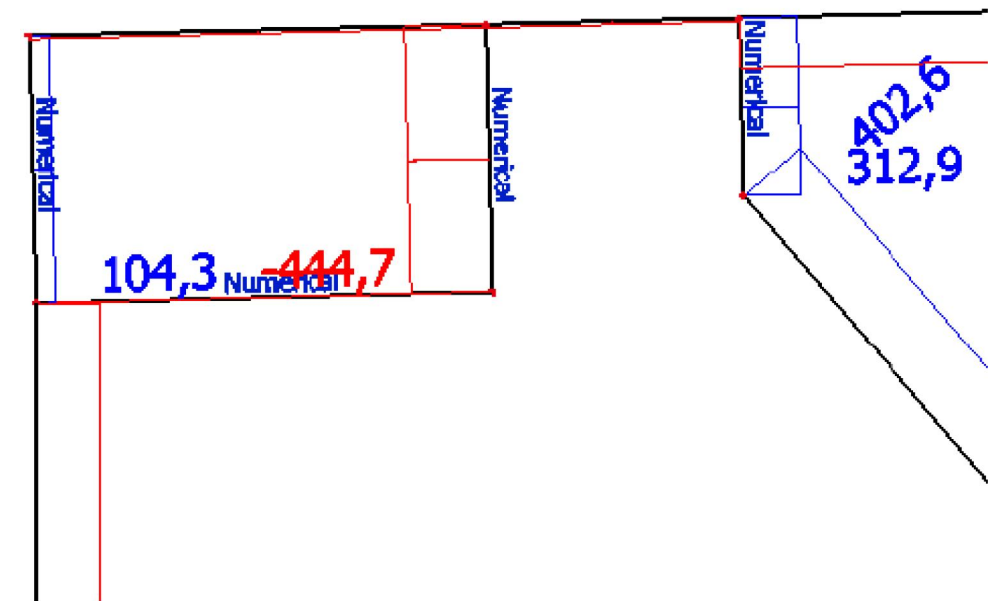
Venymäelementin poikkileikkausala:	$A := \frac{k\cdot L}{E} = \frac{64256621.95\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot 0.09\cdot\text{m}}{210\cdot\text{GPa}} = 27.54\cdot\text{mm}^2$
Kahden ruuvien vetovoima yhteensä:	$F_{\text{ruuvit}} := 2\cdot F = 2\cdot 57640\cdot\text{N} = 115.28\cdot\text{kN}$

SCIA Engineer 16.1 -ohjelman antama vetorasitus venymäelementille

Versio 1: Vetorasitus on 93,3 kN



Versio 2: Vetorasitus on 104,3 kN



Unrein_medi_col300

Lähtötiedot

Kimmoduli:	$E := 210\text{GPa}$	
Yhden ruuvin vetovoima:	$F := 33830\text{N}$	(FEM, Ansys 18.0)
Liitoslevyn paksuus:	$t_p := 15\text{mm}$	
Liitoslevyn pituus:	$h_p := 290\text{mm}$	
Paarteen korkeus:	$h_0 := 160\text{mm}$	
Ruuvien etäisyys paarteen kyljestä:	$m := 120\text{mm}$	
Ruuvien leikkauspinta-ala:	$A_s := 245\text{mm}^2$	
Ruuvien venymäpituus:	$L_b := 30\text{mm}$	

Jäykkyystekijä

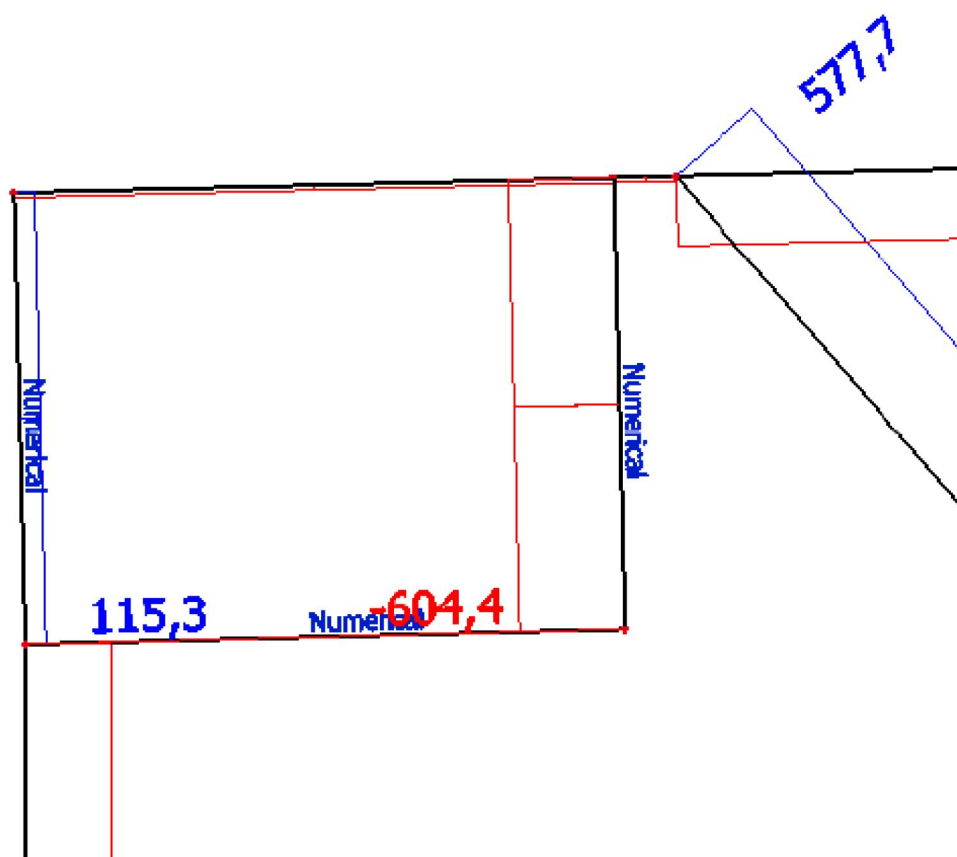
Efektiivinen leveys:	$l_{\text{eff}} := h_p = 290\cdot\text{mm}$
Venymäelementin pituus:	$L := 0.5\cdot h_0 + 2\cdot t_p = 0.5\cdot 160\cdot\text{mm} + 2\cdot 15\cdot\text{mm} = 110\cdot\text{mm}$
Päätylevyn taivutuksen jäykkyystekijä:	$k_5 := \frac{0.9\cdot l_{\text{eff}}\cdot t_p^3}{m^3} = \frac{0.9\cdot 0.29\cdot\text{m}\cdot (15\cdot\text{mm})^3}{(120\cdot\text{mm})^3} = 0.51\cdot\text{mm}$
Ruuvien vedon jäykkyystekijä:	$k_{10} := \frac{1.6\cdot A_s}{2\cdot L_b} = \frac{1.6\cdot 245\cdot\text{mm}^2}{2\cdot 30\cdot\text{mm}} = 6.53\cdot\text{mm}$
Jäykkyystekijä:	$k := \frac{1}{\frac{1}{E\cdot k_5} + \frac{1}{E\cdot k_{10}}} = \frac{1}{\frac{1}{210\cdot\text{GPa}\cdot 0.0005\cdot\text{m}} + \frac{1}{210\cdot\text{GPa}\cdot 0.0065\cdot\text{m}}}$
	$k = 99302.66\cdot\frac{\text{N}}{\text{mm}}$

Laskentamallissa käytettävän venymäelementin poikkileikkausala

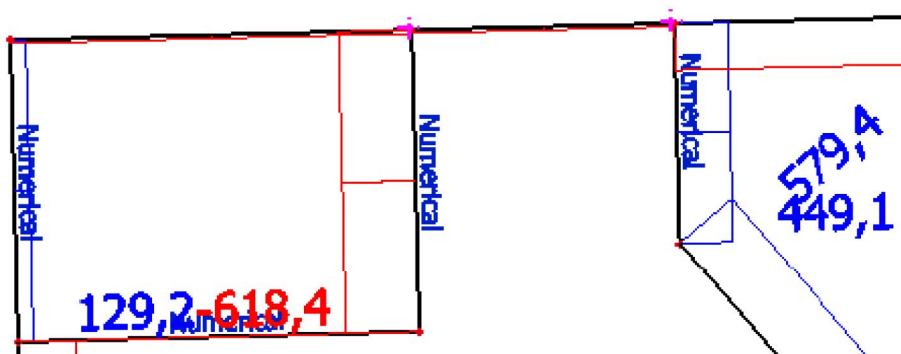
Venymäelementin poikkileikkausala:	$A := \frac{k\cdot L}{E} = \frac{99302656.6341905\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot 0.11\cdot\text{m}}{210\cdot\text{GPa}} = 52.02\cdot\text{mm}^2$
Kahden ruuvien vetovoima yhteensä:	$F_{\text{ruuvit}} := 2\cdot F = 2\cdot 33830\cdot\text{N} = 67.66\cdot\text{kN}$

SCIA Engineer 16.1 -ohjelman antama vetorasitus venymäelementille

Versio 1: Vetorasitus on 115,3 kN



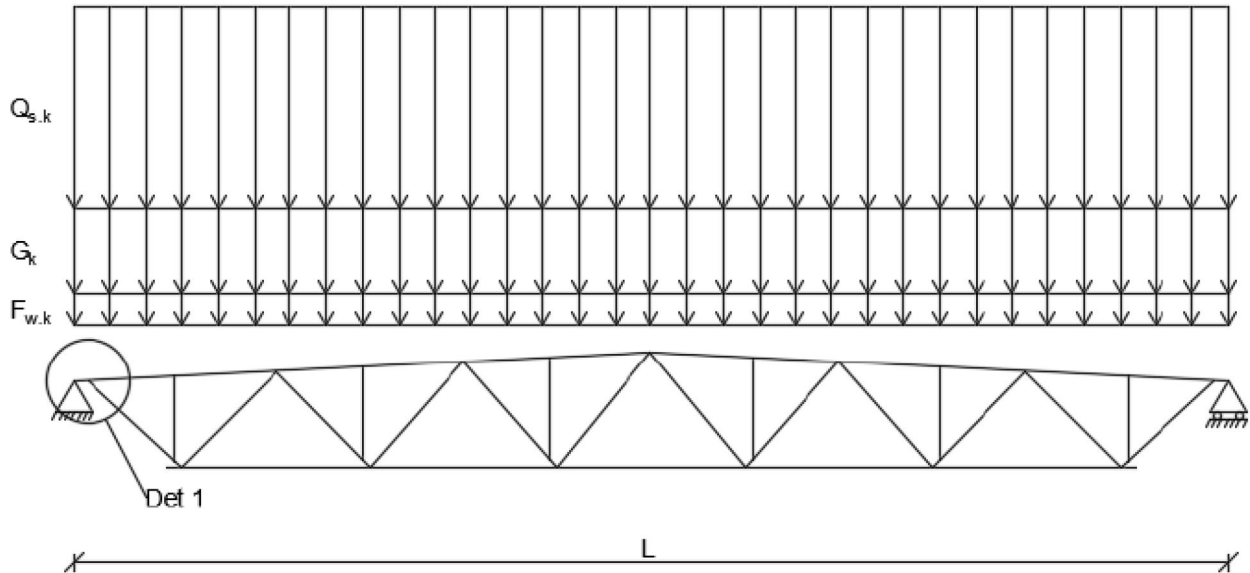
Versio 2: Vetorasitus on 129,2 kN



VAPAAVÄLIN TUTKIMINEN

LÄHTÖTIEDOT

Ristikön kuormitukset:



Ristikön jänneväli: $L_t := 16000 \text{ mm}$

Ristikön omapaino: $m_t := 820 \text{ kg}$

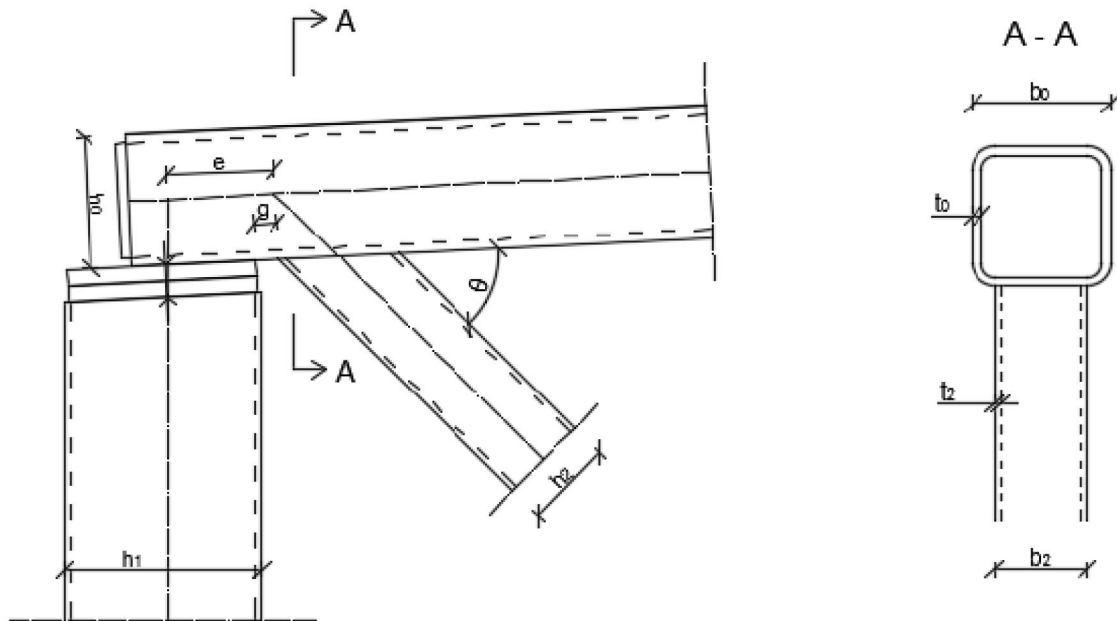
$$G_{1,k} := \frac{m_t \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{L_t} = \frac{820 \cdot \text{kg} \cdot 9.81 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{16000 \cdot \text{mm}} = 0.50276 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Ristiko omakuorma: $G_{2,k} := 6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Lumikuorma: $Q_{s,k} := 14 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Tuulikuorma: $F_{w,k} := 2.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Liitoksen rasitukset ja parametrit



Paarresauva

$$h_0 := 120\text{mm} \quad b_0 := 120\text{mm} \quad t_0 := 8\text{mm} \quad r_0 := 20\text{mm} \quad A_0 := 3364.25\text{mm}^2$$

$$I_0 := 676.88 \times 10^4 \text{mm}^4 \quad W_{el,0} := 112810\text{mm}^3 \quad W_{pl,0} := 137.81 \cdot 10^3 \text{mm}^3$$

$$\text{myötöraja } f_{y,0} := 550\text{MPa} \quad \text{vetomurtolujuus } f_{u,0} := 600\text{MPa}$$

Uumasauva

$$h_2 := 80\text{mm} \quad b_2 := 80\text{mm} \quad t_2 := 5\text{mm} \quad r_2 := 10\text{mm} \quad A_2 := 1435.62\text{mm}^2$$

$$I_2 := 131.44 \cdot 10^4 \text{mm}^4 \quad W_{el,2} := 32.86 \cdot 10^3 \text{mm}^3 \quad W_{pl,2} := 39.74 \cdot 10^3 \text{mm}^3$$

$$\text{myötöraja } f_{y,2} := 420\text{MPa} \quad \text{vetomurtolujuus } f_{u,2} := 500\text{MPa}$$

Pilari:

$$h_1 := 180\text{mm} \quad b_1 := 180\text{mm} \quad t_1 := 6\text{mm}$$

Materiaalitiedot:

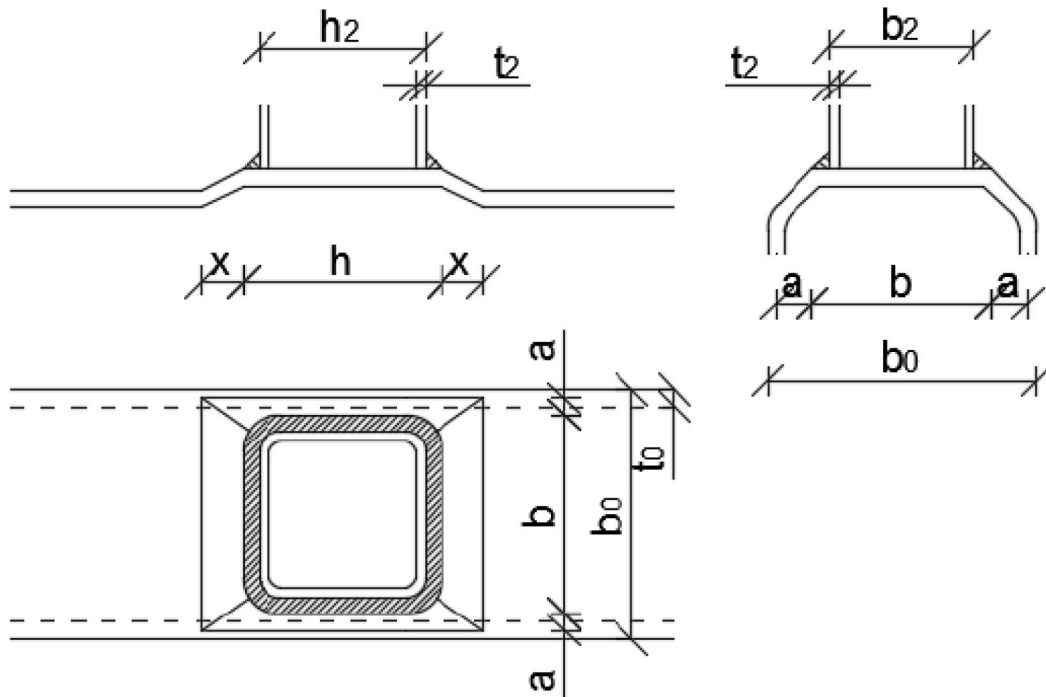
$$E := 210\text{GPa} \quad \gamma_{M0} := 1.00 \quad \gamma_{M1} := 1.00 \quad \gamma_{M2} := 1.25 \quad \gamma_{M5} := 1.00$$

Mitat:

$$\text{Vapaaväli } g := 25\text{mm} \quad \text{Uumasauvan kulma } \theta := 46^\circ$$

$$\text{Epäkeskisyys } e := 110\text{mm}$$

VAPAAVÄLI



Yllä oleva kuva kuvastaa myötöviivateoriaan perustuvaan putken pinnan myötäämiskuviota.

Myötöviivateoriaan perustuen muodonmuutostyön minimikohdassa mitta x lasketaan alla olevasti (mitat a ja b ja h tulevat putkien profileista ja hitsin a-mitasta.)

Hitsin a-mitta: $a_{\text{hitsi}} := 1.11 \cdot t_2 = 1.11 \cdot 5 \cdot \text{mm} = 5.55 \cdot \text{mm}$

Hitsin "hyllly": $h_{\text{hitsi}} := \sqrt{a_{\text{hitsi}}^2 + a_{\text{hitsi}}^2} = \sqrt{(0.00555 \cdot \text{m})^2 + (0.00555 \cdot \text{m})^2} = 7.84889 \cdot \text{mm}$

Mitat: $b := b_2 + 2 \cdot h_{\text{hitsi}} = 80 \cdot \text{mm} + 2 \cdot 0.00785 \cdot \text{m} = 95.69777 \cdot \text{mm}$

$$a := \frac{b_0}{2} - \frac{t_0}{2} - \frac{b}{2} = \frac{120 \cdot \text{mm}}{2} - \frac{8 \cdot \text{mm}}{2} - \frac{0.0957 \cdot \text{m}}{2} = 8.15111 \cdot \text{mm}$$

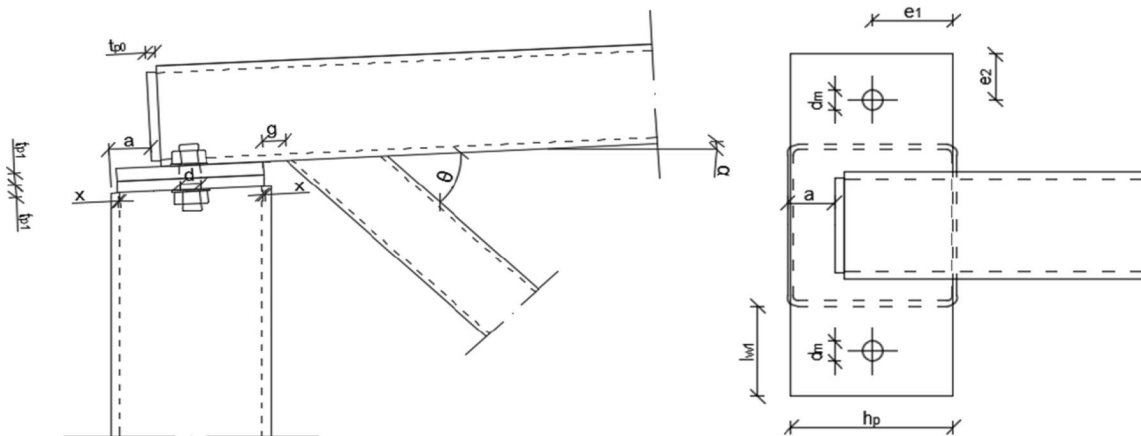
$$h := h_2 + 2 \cdot h_{\text{hitsi}} = 80 \cdot \text{mm} + 2 \cdot 0.00785 \cdot \text{m} = 95.69777 \cdot \text{mm}$$

$$x := \sqrt{\frac{a \cdot (b + 2 \cdot a)}{2}} = \sqrt{\frac{0.00815 \cdot \text{m} \cdot (0.0957 \cdot \text{m} + 2 \cdot 0.00815 \cdot \text{m})}{2}} = 21.36498 \cdot \text{mm}$$

LIITOKSET

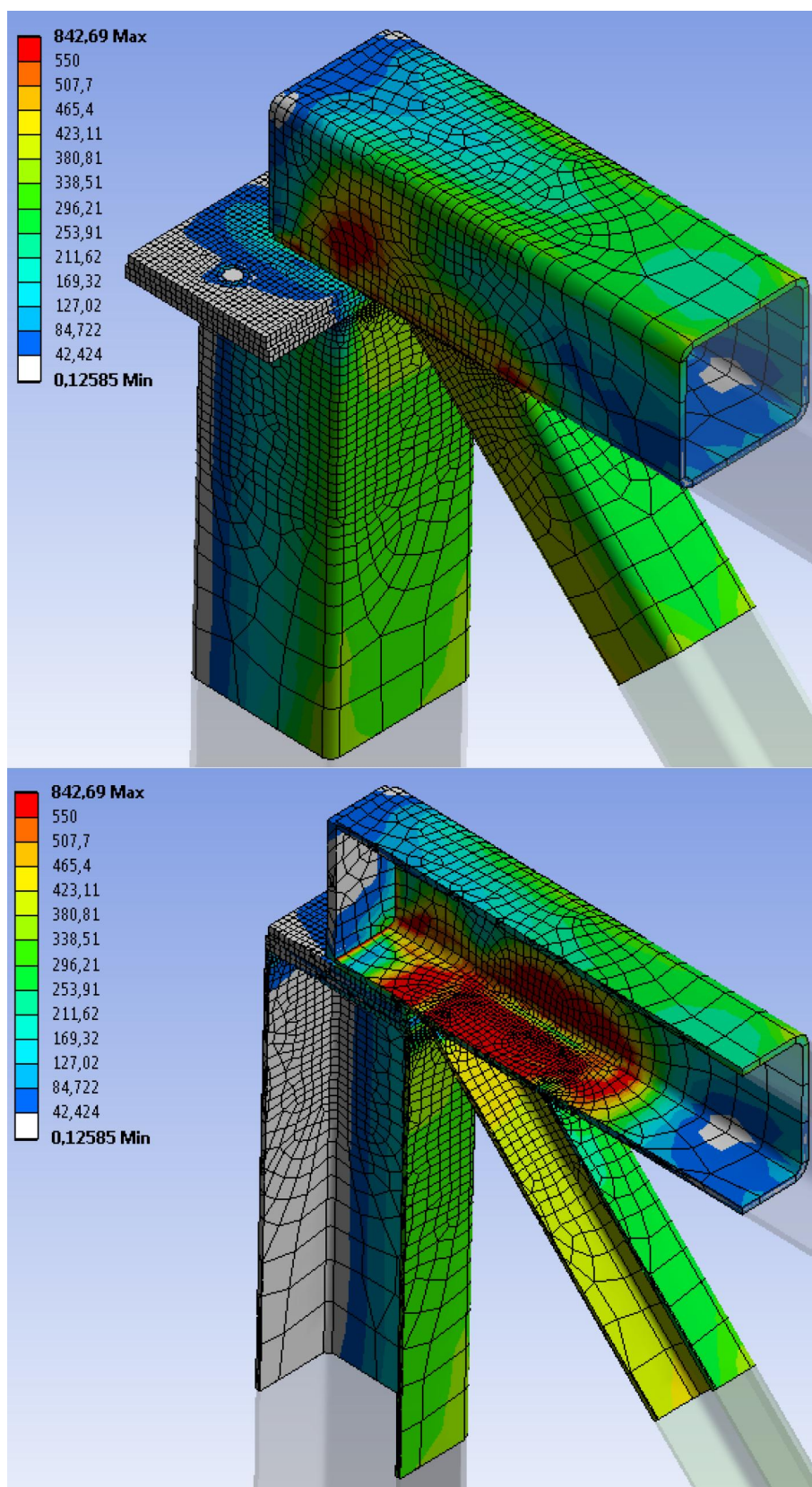
Tiedosto	Vahvistus (S355/S550)	Paarre (S550)	Diagonaali (S420)	Pilari (S420, *S355)
Koekuormitetut				
1. Rein_medi_col250_tested.wbpj	Vahvistettu	CFRHS140x140x6	CFRHS100x100x5	CFRHS250x250x10*
2. Unrein_large_col250_tested.wbpj	Vahvistamaton	CFRHS160x160x8	CFRHS140x140x7.1	CFRHS250x250x10*
Vahvistetut				
3. Rein_large_col200.wbpj	Vahvistettu	CFRHS180x180x8,8	CFRHS120x120x6	CFRHS200x200x6
4. Rein_large_col300.wbpj	Vahvistettu	CFRHS180x180x8,8	CFRHS120x120x6	CFRHS300x300x8
Vahvistamattomat				
5. Unrein_large_col200.wbpj	Vahvistamaton	CFRHS180x180x8,8	CFRHS120x120x6	CFRHS200x200x6
6. Unrein_large_col300.wbpj	Vahvistamaton	CFRHS180x180x8,8	CFRHS120x120x6	CFRHS300x300x8

DIMENSIOT

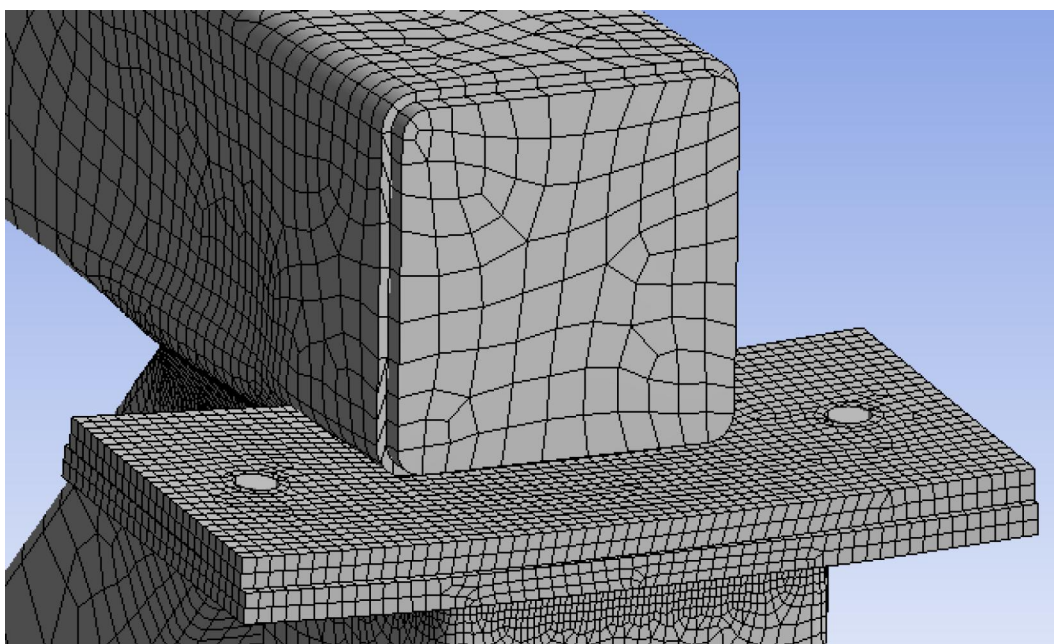


Liitoskokonaisuus		1.	2.	3.	4.	5.	6.
Paarteen pään ja pilarin ulkolinjan väli	a [mm]	20	20	80	80	80	80
Liitoslevyn ja pilarin seinämän päällekkäisyys	x [mm]	5	5	2	2	2	2
Liitoslevyjen paksuus	t _{p1} [mm]	20	20	15	15	15	15
Liitoslevyn uloke	l _{w1} [mm]	150	140	100	100	100	100
Liitoslevyn pituus	h _p [mm]	240	240	192	288	192	288
Paarteen päätylevyn paksuus	t _{p0} [mm]	20	20	12	12	12	12
Ruuvien halkaisija	d [mm]	30	30	20	20	20	20
Ruuvireijän halkaisija	d _m [mm]	33	33	22	22	22	22
Vapaaväli	g [mm]	25	25	25	25	25	25
Yläpaarteen kulma	α [°]	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Diagonaalin kulma	θ [°]	33	33	45	45	45	45
Ruuvien reunaetäisyys 1	e ₁ [mm]	85	85	96	144	96	144
Ruuvien reunaetäisyys 2	e ₂ [mm]	50	50	50	50	50	50

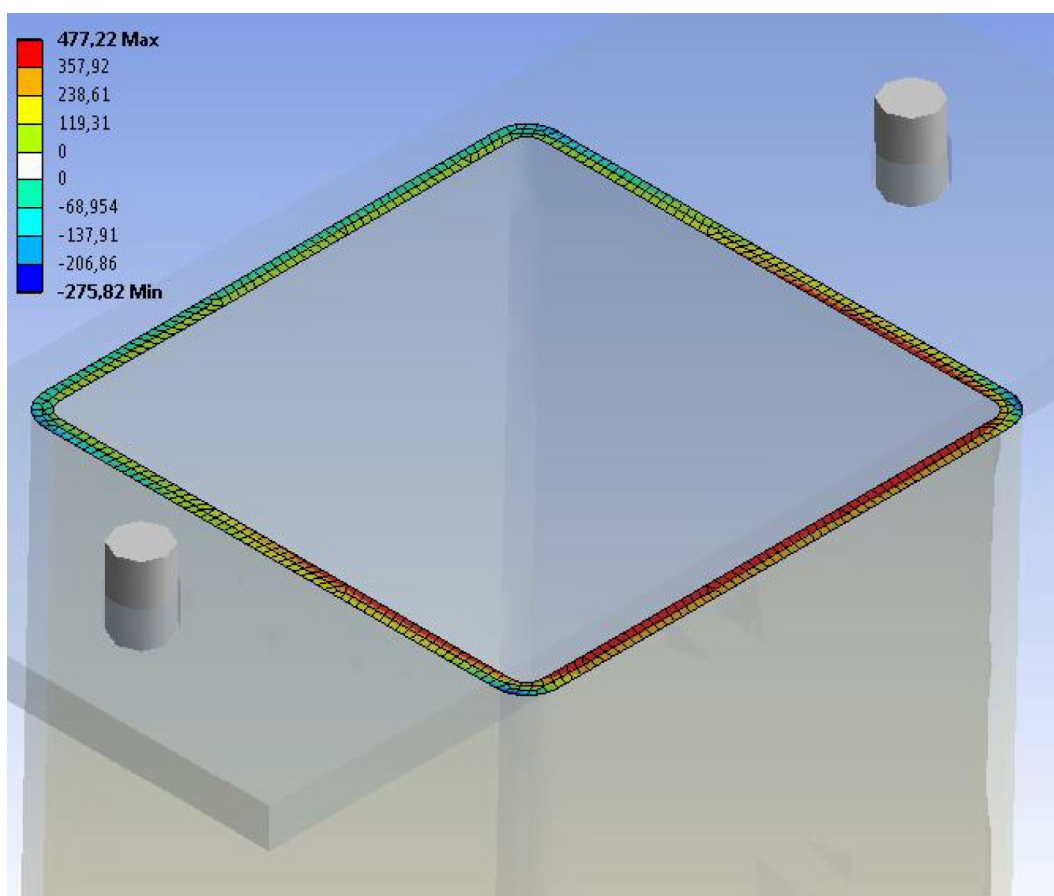
TIEDOSTO: Unrein_large_col200



Kuvat: Liitoskokonaisuuden jännitysjaakauma

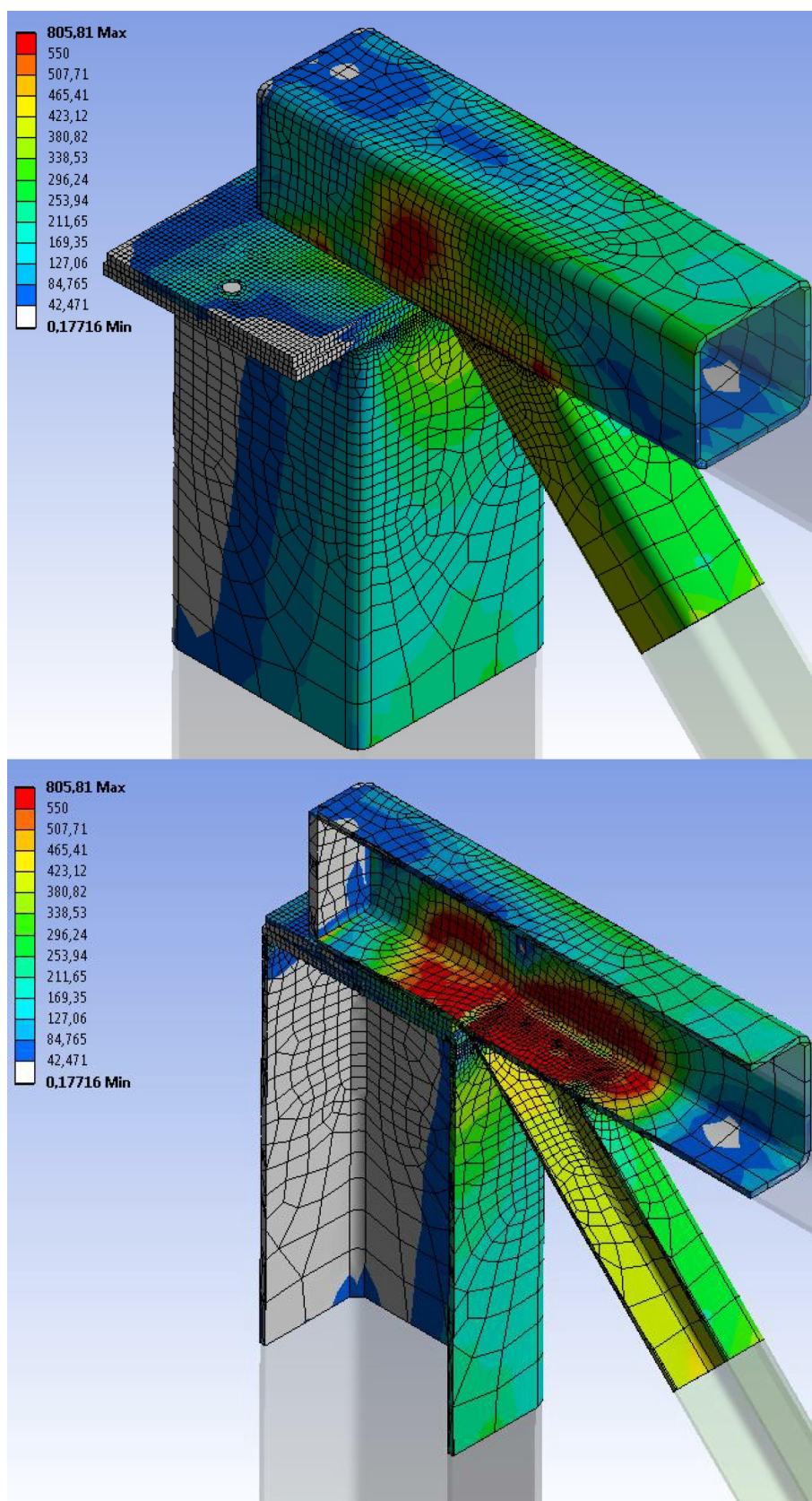


Kuva: Liitoslevyn taipuma

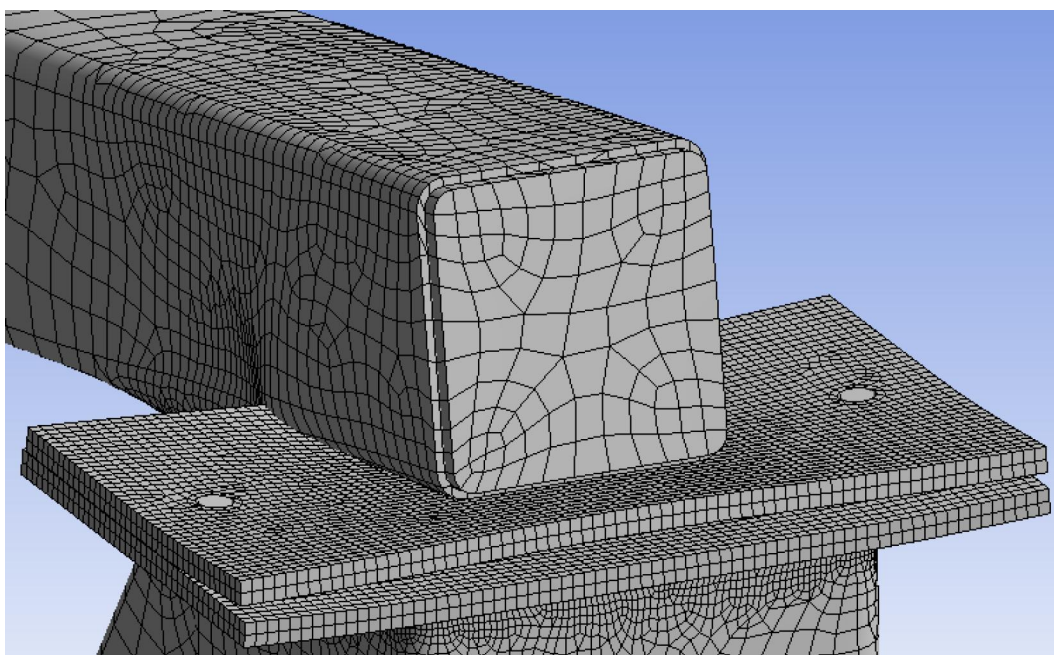


Kuva: Pilarin jännitysjauma

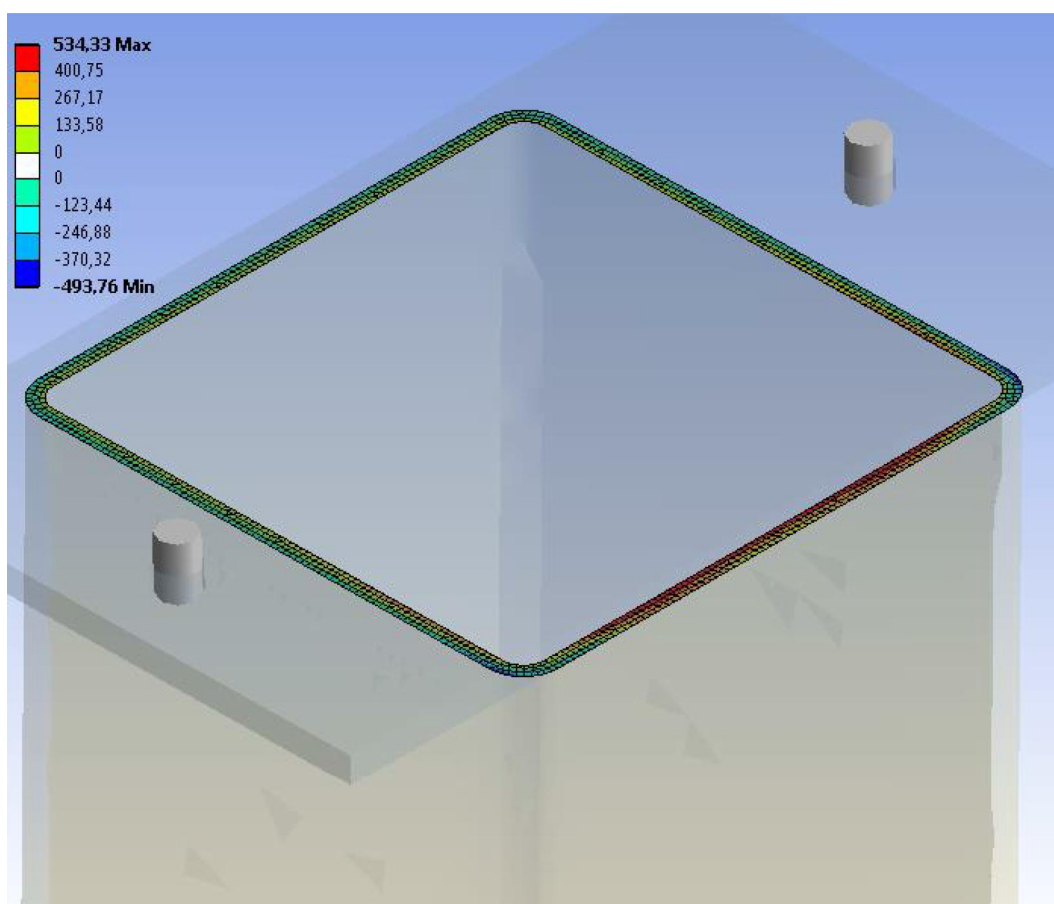
TIEDOSTO: Unrein_large_col300



Kuvat: Liitoskokonaisuuden jännitysjaakauma

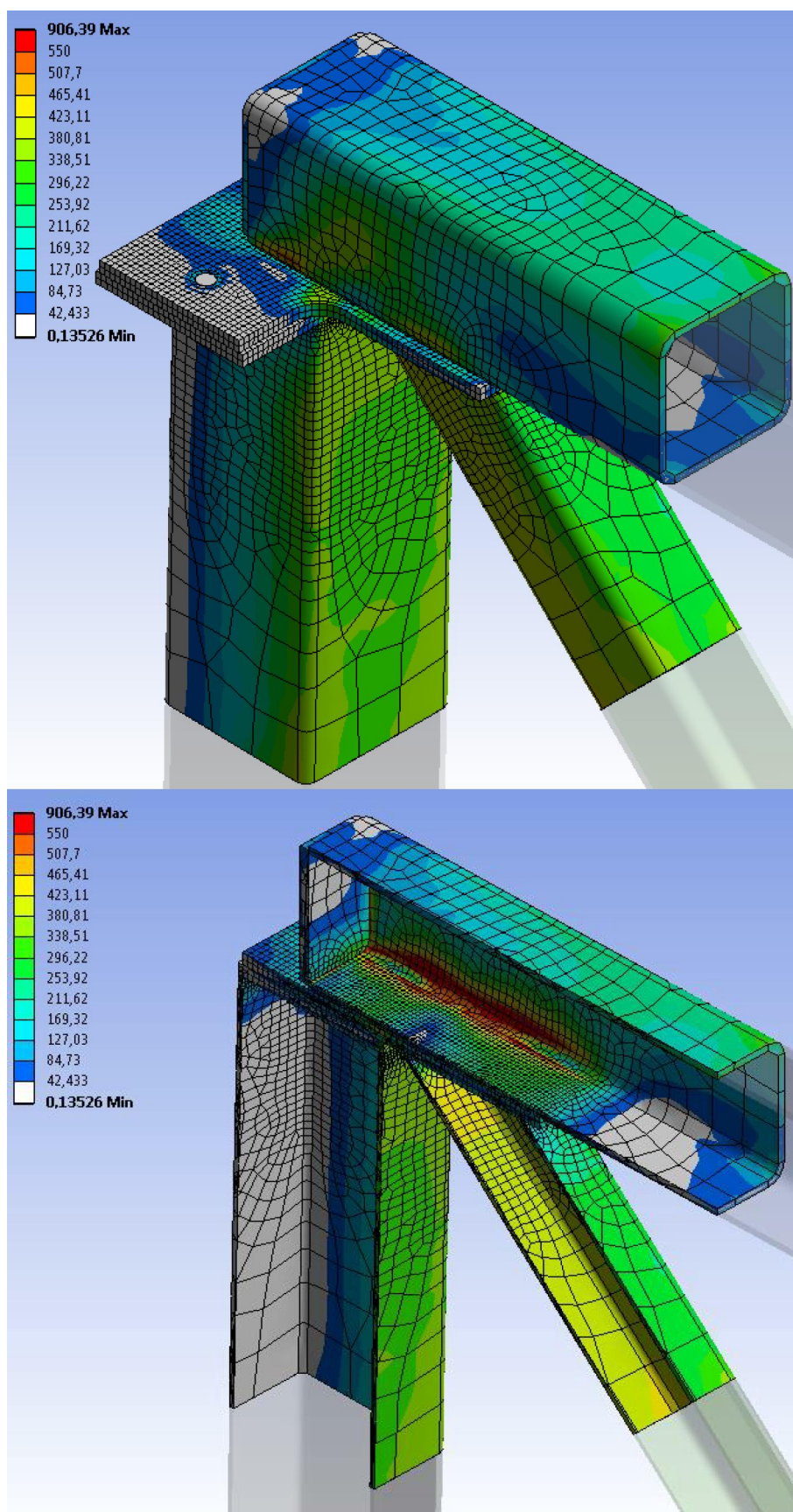


Kuva: Liitoslevyn taipuma

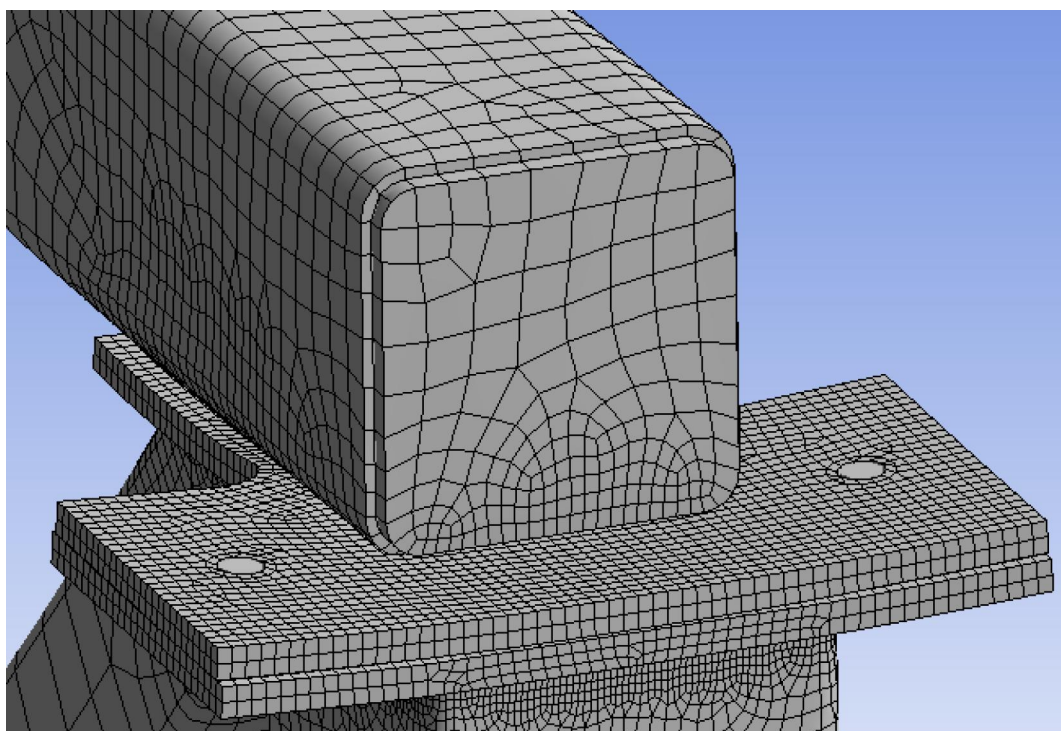


Kuva: Pilarin jännitysjauma

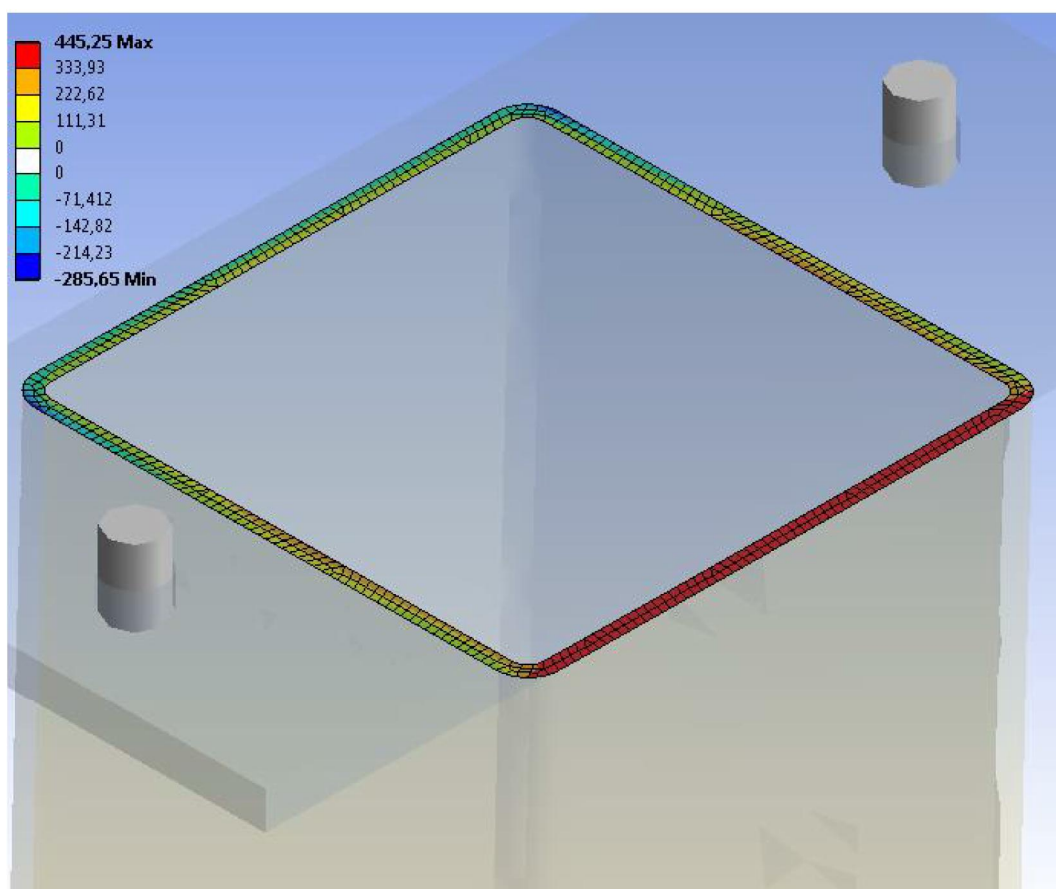
TIEDOSTO: Rein_large_col200



Kuvat: Liitoskokonaisuuden jännitysjauma

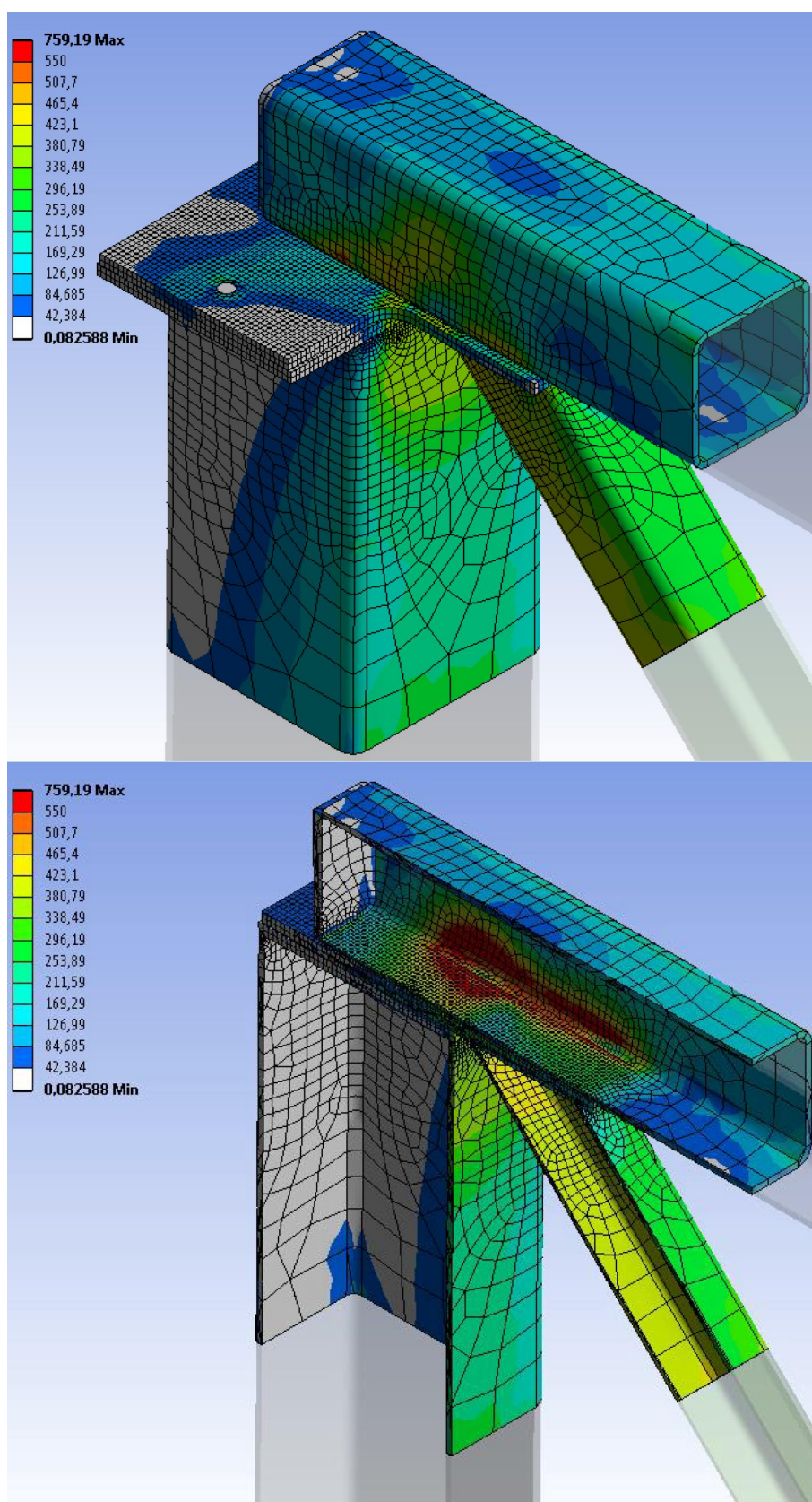


Kuva: Liitoslevyn taipuma

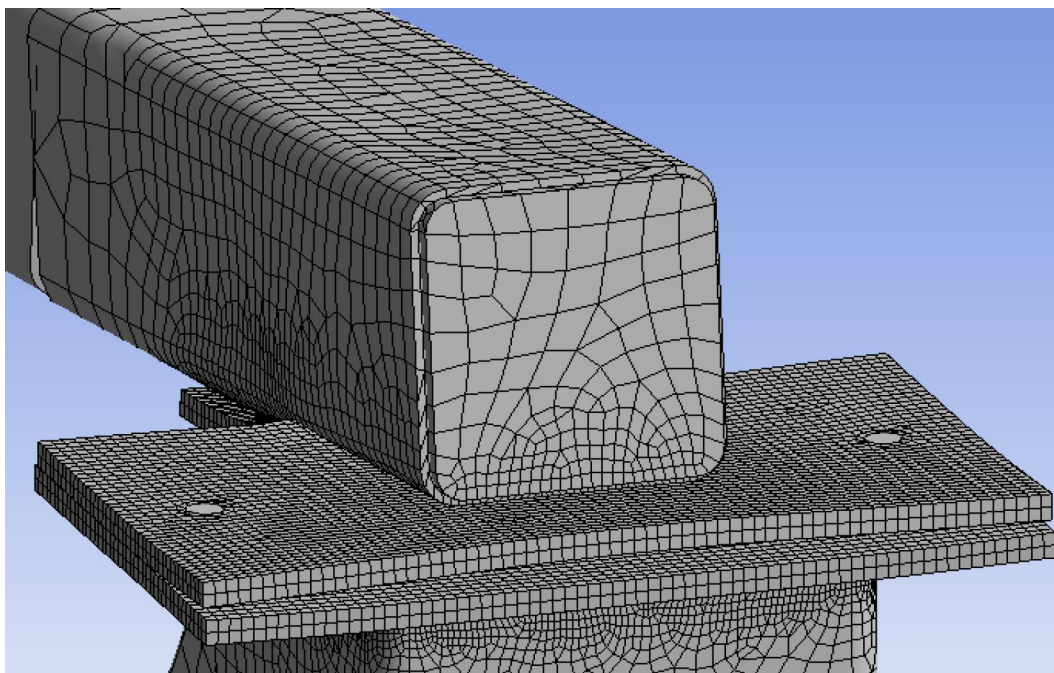


Kuva: Pilarin jännitysjauma

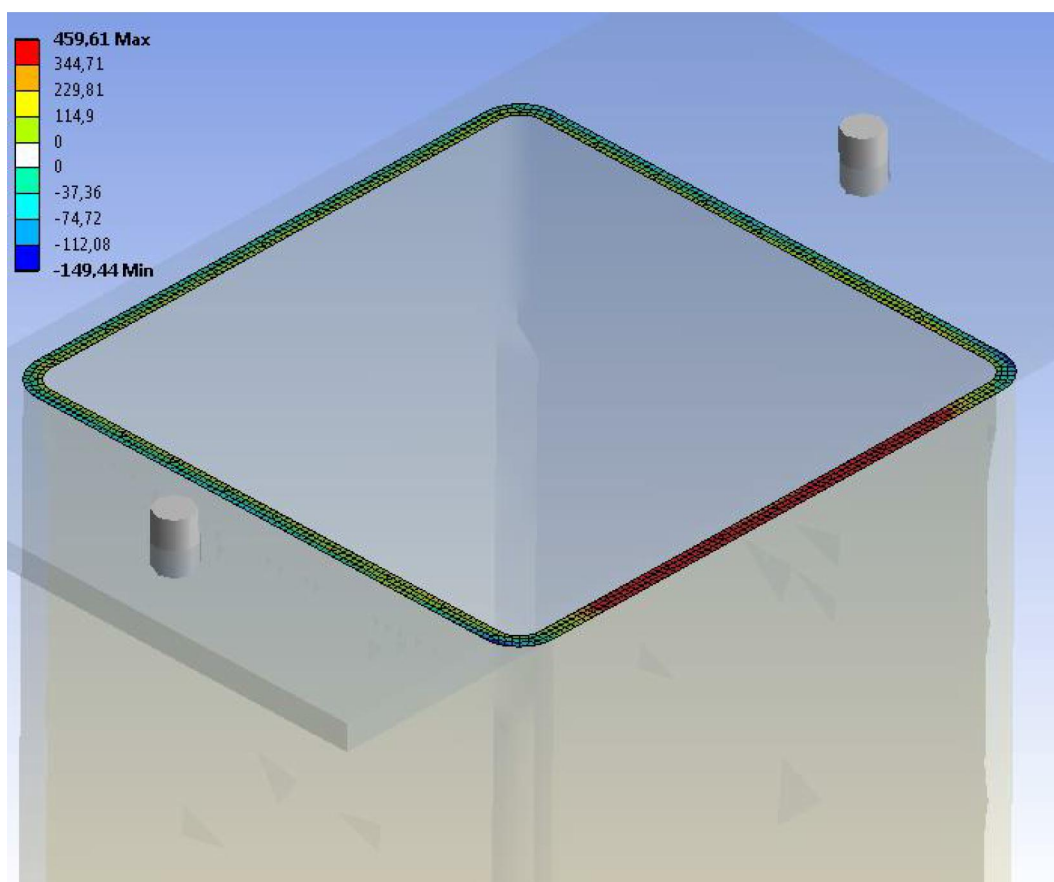
TIEDOSTO: Rein_large_col300



Kuvat: Liitoskokonaisuuden jännitysjaakauma

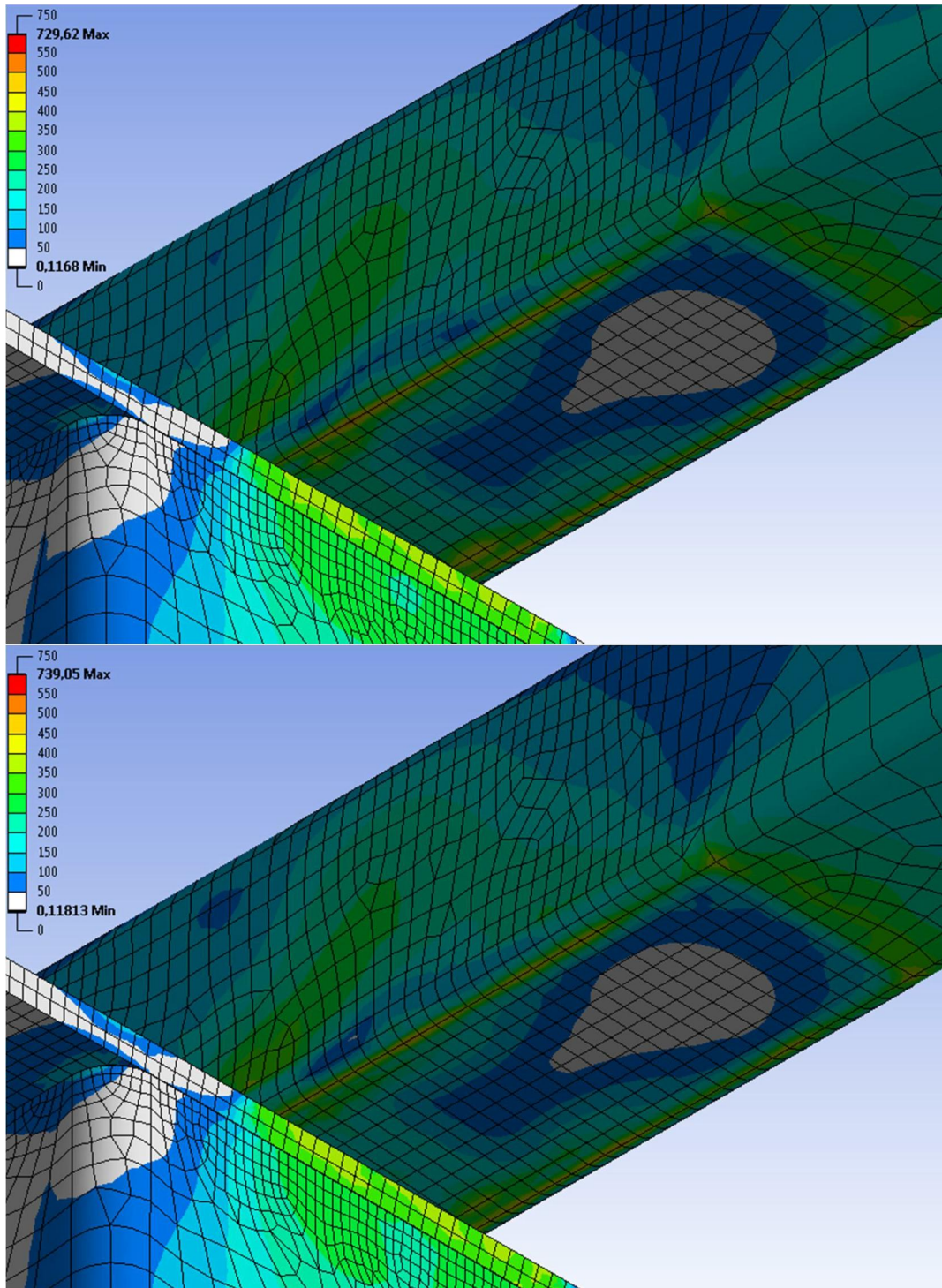


Kuva: Liitoslevyn taipuma

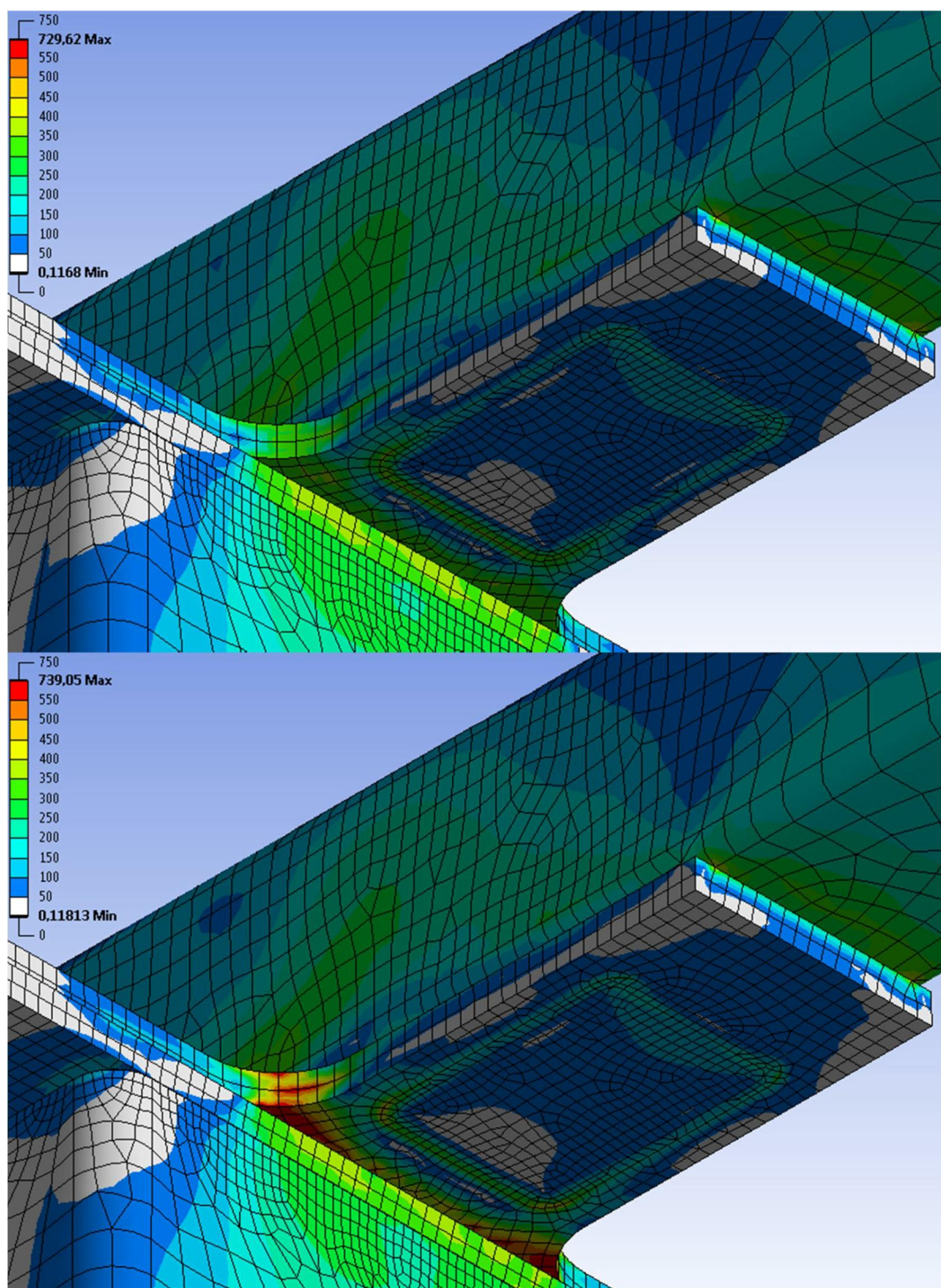


Kuva: Pilarin jännitysjaakauma

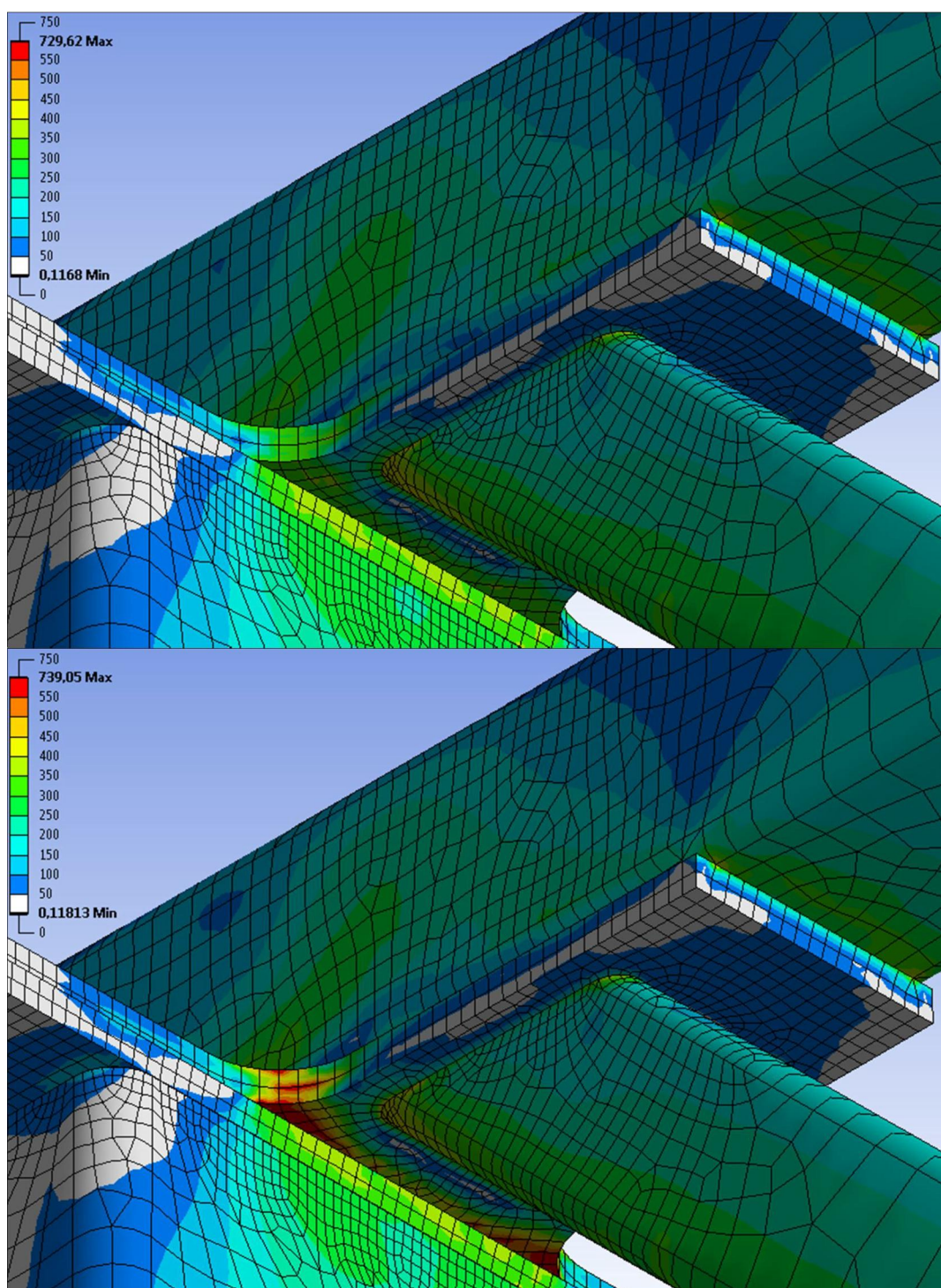
TIEDOSTO: Rein_small_col300



Kuvat: Yläpaarteen jännitysjaakauma. Ylemmässä kuvassa vahvikelevyn lujuus on S355 ja alemmassa kuvassa vahvikelevyn lujuus on S550.

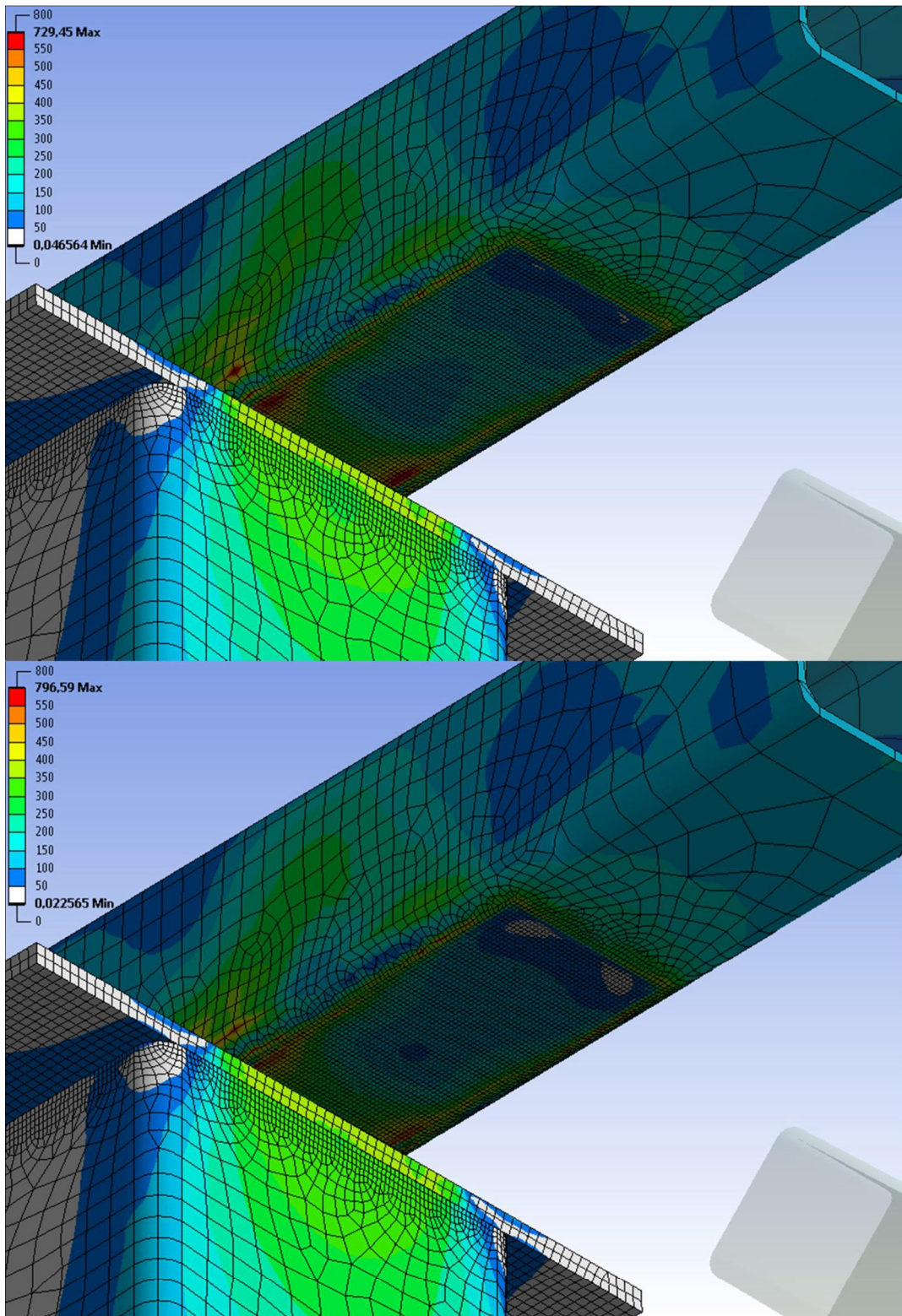


Kuvat: Liitoslevyn jännitysjaakauma. Ylemmässä kuvassa vahvikelevyn lujuus on S355 ja alemmassa kuvassa vahvikelevyn lujuus on S550.

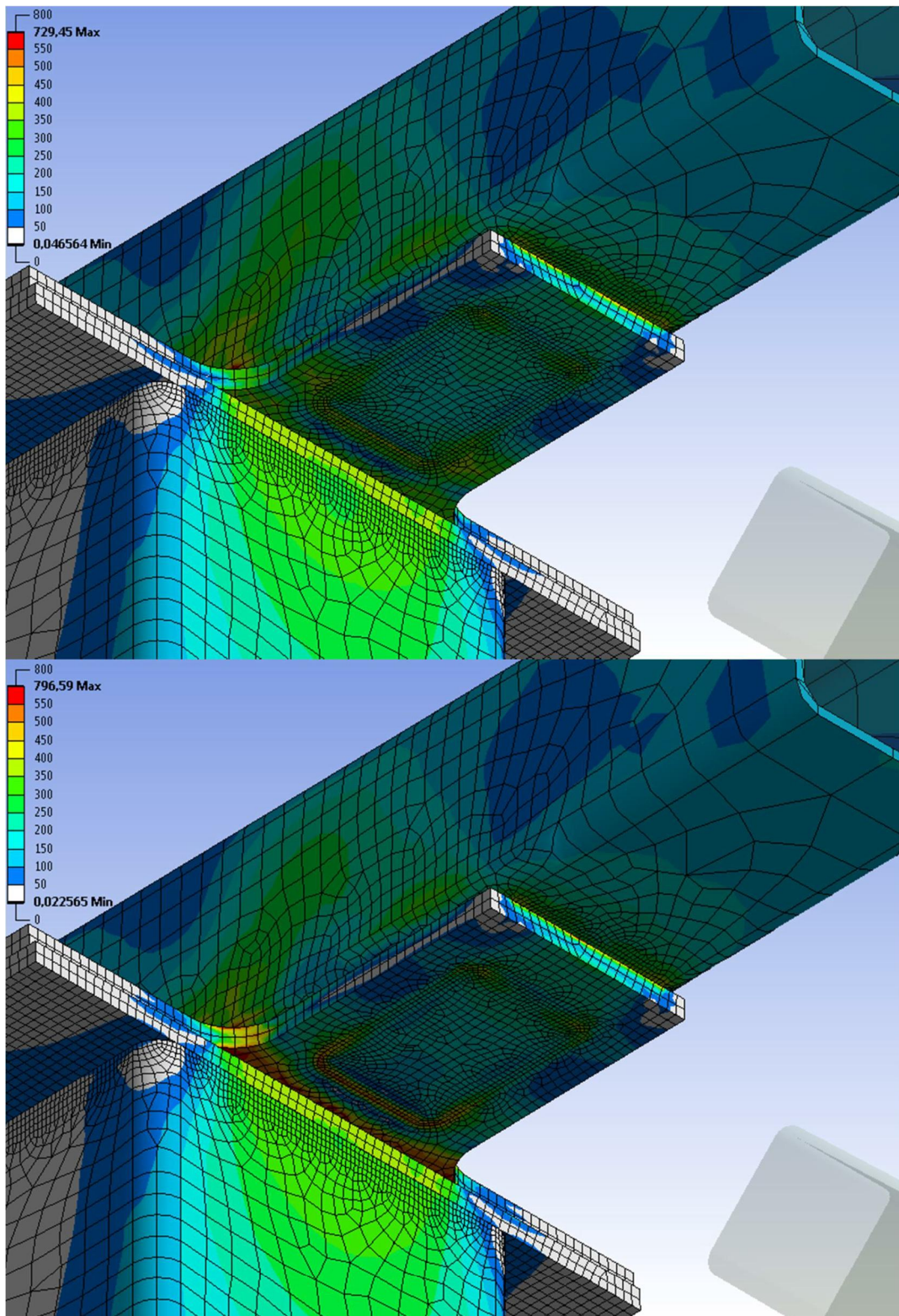


Kuvat: Diagonaalin jännitysjaakauma. Ylemmässä kuvassa vahvikelevyn lujuus on S355 ja alemmassa kuvassa vahvikelevyn lujuus on S550.

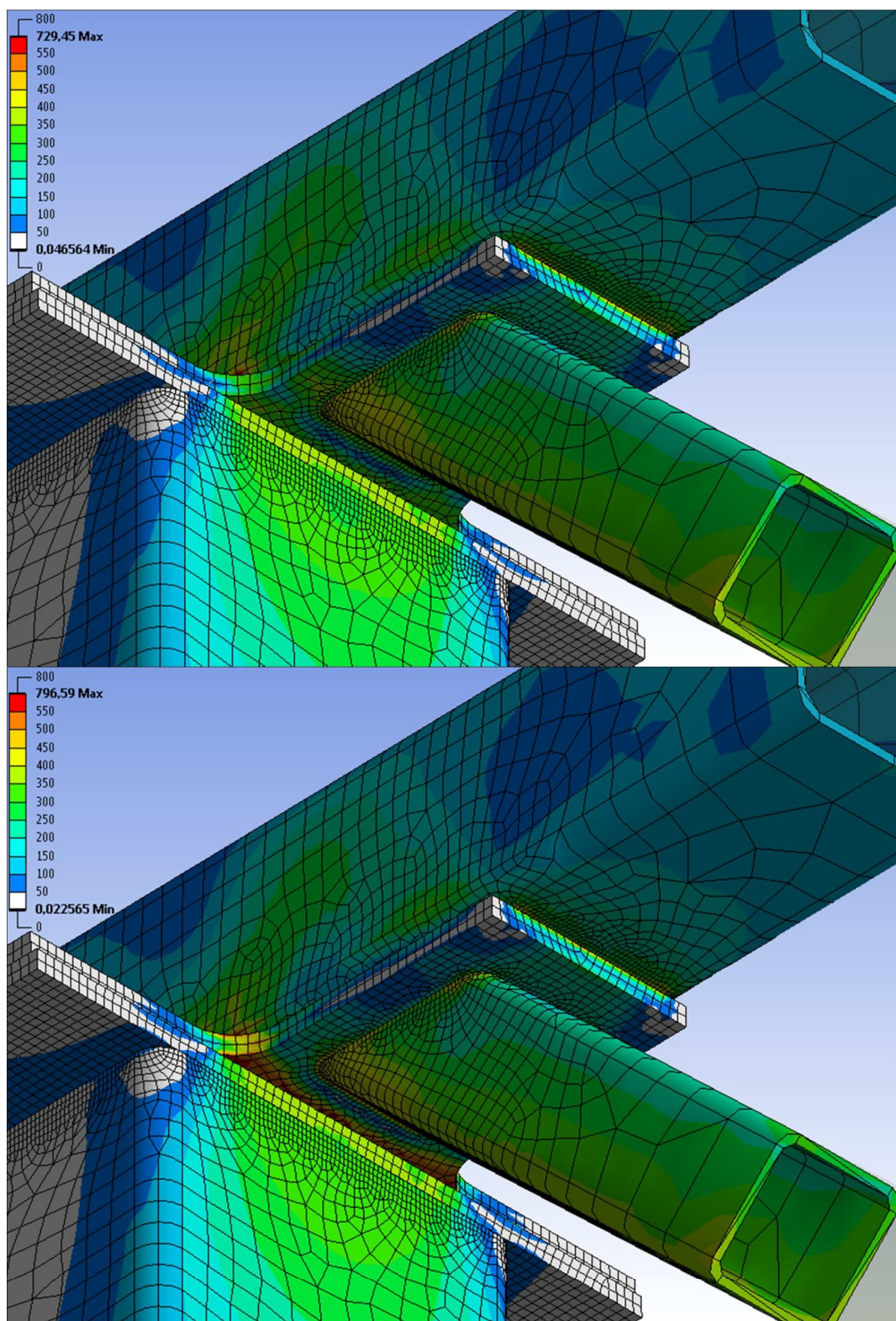
TIEDOSTO: Rein_medi_col300



Kuvat: Yläpaarteen jännitysjaakauma. Ylemmässä kuvassa vahvikelevyn lujuus on S355 ja alemmassa kuvassa vahvikelevyn lujuus on S550.



Kuvat: Liitoslevyn jännitysjaakauma. Ylemmässä kuvassa vahvikelevyn lujuus on S355 ja alemmassa kuvassa vahvikelevyn lujuus on S550.



Kuvat: Diagonaalien jännitysjaakauma. Ylemmässä kuvassa vahvikelevyn lujuus on S355 ja alemmassa kuvassa vahvikelevyn lujuus on S550.